



FÜÜSIKA PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID MITTEFÜÜSIKUTELE III

OPTIKA

Koostanud H.Teral

Kinnitatud füüsika-keemiateaduskonna nõukogus
19. jaan. 1983.a.

Käesolev väljaanne on kogumiku "Füüsika praktikumi töö-
juhendid mittefüüsikutele" II (Tartu, 1981) järg.

Raamat sisaldab optika-alaseid juhendeid.

S I S U K O R D

17. Tutvumine mikroskoobiga	5
18. Vedeliku murdumisnäitaja määramine Abbe refraktomeetriga	21
19. Spektroskoobi gradueerimine	31
20. Suhkrulahuse kontsentratsiooni määramine sahharimeetriga	44
21. Fotoelemendi kasutamine luksmeetrina	52

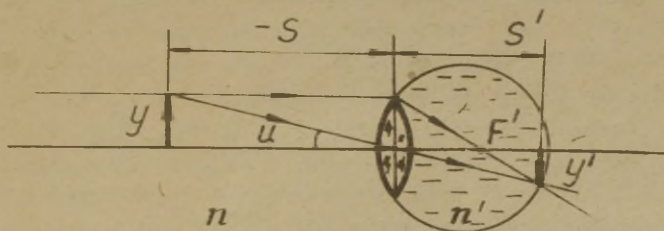
TUTVUMINE MIKROSKOOBIGA

Mikroskoobi teooria ja ehitus

1. Silma optilised omadused

Mikroskoopi kasutatakse väikeste lähedal asuvate objektide vaatlemiseks. Mikroskoobiga saadud objekti kujutist vaatleme silma abil ja seepärast peab mikroskoopide konstrueerimisel arvesse võtma ka inimese silma kui optilise süsteemi omadusi. Alljärgnevalt vaatleme silma kaht füsioloogilise ehituse eripära, mis on antud juhul olulised.

Silma põhiliseks lätseks on silmaläätis, mis tekitab eseme y kujutise y' silma võrkkestal (vt. joonis 1).



Joon. 1. Kujutise tekkimine silma optilises süsteemis.

Silmaläätse taga asub klaaskeha, mille murdumisnäitaja ($n' = 1,336$) erineb õhu murdumisnäitajast ($n \approx 1$). Kasutades silmaläätse jaoks õhukese lätse valemit, saame

$$\frac{n'}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

kus f on silmaläätse eesmine fookuse kaugus, s - eseme kaugus silmani (kuni silmaläätse tsentrini), s' - kaugus

silmaläätse keskpunktist võrkkestani. Silma puhul s' ja n on konstandid. Selleks et silmast erinevatel kaugustel s asuvate esemete kujutised satuksid silma võrkkestale, peab vastavalt valemile (1) kauguse s muutumisel muutuma ka silmaläätse fookuse kaugus f . Selleks on silmal erilised lihased, mis muudavad silmaläätse kõverust (s.t. optilist tugevust) ja võimaldavad akommodeerida silma väga suurtes piirides. Silma optiline tugevus $\frac{1}{f}$ on 60...70 dioptriati. Eseme lähendamisel täiskasvanud inimese silmale kuni 25 cm kaugusele toimub akommodeerumine raskusteta. Kaugust $L = 25$ cm nimetatakse parima nägemise kauguseks. Veelgi lähemal asuvate esemete vaatlemiseks peame juba silma pingutama.

Vaatleme silma teist iseärasust. Valgus, mis satub silma võrkkestale, ärritab seal valgustundlikke retseptoreid. Need ärritused antakse edasi peaaajule, tekitades seal nägemistaju. Valgustundlikud retseptorid asuvad üksteisest teatud väikesel kaugusel. Kui eseme kujutis on niivõrd väike, et ta katab ainult ühe valgustundliku retseptori, siis inimene näeb seda eset üksiku helendava punktina. Selleks et eseme äärmiste punktide kujutis satuks kõrvuti olevatele valgustundlikele retseptoritele, on vaja, et ese oleks nähtav teatud minimaalsest vaatenurgast u_{\min} suurema nurga all (vt. joon.1). Nurk u_{\min} on ligikaudu $1'$ ja vastav eseme punktide vaheline kaugus on siis $70 \mu\text{m}$, kui ese asub parima nägemise kaugusel. Kujutise suurus on sel puhul $5 \mu\text{m}$. Vaatenurk määratakse valemist $\text{tg } u = \frac{y}{s}$, s.t. vaatenurk sõltub nii eseme suurusest kui ka eseme kaugusest silmani.

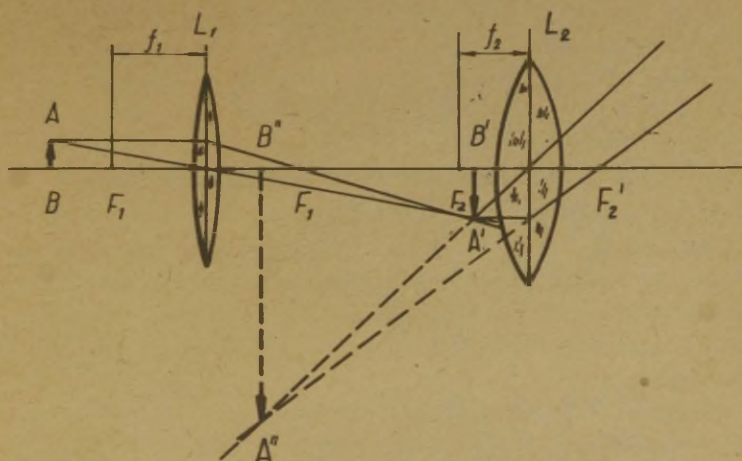
Niisiis võime teha järelduse: inimene ei näe liiga kaugete või liiga väikeste esemete detaile (näeb neid punktidenä).

2. Kujutise tekkimine mikroskoobis

Mikroskoobi optiline skeem on kujutatud joonisel 2. Lühikesefookuseline lääts L_1 (suure suurenduse saavutamiseks) on objektiiviks, teine lühikesefookuseline lääts L_2 - okulaariks.

Ese AB asub objektiivi ees objektiivi eesmisest fookuse-

kaugusest veidi suuremal kaugusel. Seetõttu tekitab objektiiv esemest tõelise suurendatud kujutise $A'B'$.



Joon. 2. Kujutise tekkimine mikroskoobis.

Objektiivi poolt tekitatud suurendus avaldub valemiga

$$K_{\text{obj.}} = \frac{s'}{s} \approx \frac{\Delta}{f_1},$$

kus f_1 on objektiivi eesmine fookuskaugus, s - kaugus esemest objektiivini, s' - kaugus objektiivist kujutiseni, mis on praktiliselt võrdne kaugusega Δ objektiivi tagumisest fookusest okulaari eesmise fookuseni. (Mikroskoobi objektiivi fookuskaugus on tavaliselt väga väike.) Suurust Δ nimetatakse mikroskoobi optiliseks pikkuseks. Okulaar toimib luubina. Kujutis $A'B'$, mida võib vaadelda esemena läätse L_2 suhtes, asub läätse L_2 eesmise fokaaltasandi ja läätse vahel (praktiliselt fokaaltasandis). Okulaar tekitab suurendatud näiva kujutise $A''B''$. Tavaliselt vaatleme kujutist silma parima nägemise kauguselt L . Okulaari suurendus on

$$K_{\text{ok}} = \frac{A''B''}{A'B'} \approx \frac{L}{f_2},$$

kus f_2 on okulaari eesmine fookusekaugus. Mikroskoobi kogusuurendus

$$K = \frac{A''B''}{AB} = \frac{\Delta L}{f_1 f_2} \quad (2)$$

ehk

$$K = K_{\text{obj.}} \cdot K_{\text{ok.}} \quad (3)$$

3. Lahutusvõime, apertuurarv ja mikroskoobi kasulik suurendus

Kahe punkti vahelist vähimat kaugust, mida mikroskoobi-ga võib eristada, nimetatakse mikroskoobi piirlahutuseks. Näiteks bioloogiliste preparaatide korral saame eristada ainult selliseid struktuuridetaile, mis on suuremad kui piirlahutus.

Lahutusvõimeks nimetatakse piirlahutuse pöördväärtust. Kogu mikroskoobi lahutusvõime oleneb objektiivi lahutusvõimest. Okulaar ei too esile mingeid preparaadi struktuuri täiendavaid detaile, ta vaid suurendab vaatenurka.

Optilise riista lõplik lahutusvõime on tingitud valguse lainelisest omadusest. Kui vaatleme objekte, millede mõõtmed on valguse lainepikkusega samas suurusjärgus, siis terava kujutise saamist takistab valguse kõrvallekaldumine sirgjoonelisest levimissuunast - valguse difraktsioon. Isegi ideaalse optilise süsteemiga (s.t. sellisega, kus on kõrvaldatud kõik aberratsioonid) ei saa liialt väikestest objektidest teravat kujutist, sest tekivad nn. difraktsioonirõngad, mis kattuvad ja objekti üksikosi ei ole võimalik eristada.

Lahutusvõime teooria töötas välja E. Abbé. Hiljem täiendasid seda teooriat L.I. Mandelstam ja D.S. Roždestvenski (vt. kirjandust 1 ja 2). Teooriast järeldub, et valgustades preparaati paralleelsete kiirte kimbuga, avaldub piirlahutus valemiga

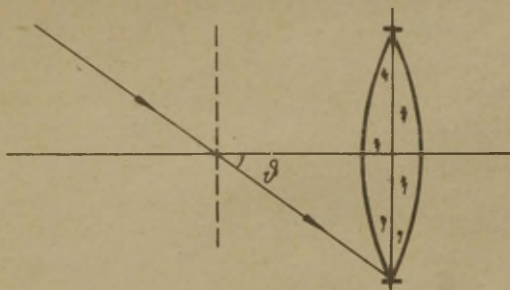
$$d = \frac{\lambda_0}{n \cdot \sin \vartheta} \quad (4)$$

Selles valemis on λ_0 kasutatava valguse lainepikkus vaakumis. Suurust $A = n \cdot \sin \vartheta$ nimetatakse mikroskoobi

apertuurarvuks. n on objektiivi ja objekti vahel oleva keskkonna murdumisnäitaja, ϑ - nurk optilise telje ja vaadeldava objekti tsestrist objektiivi äärele tuleva kiire vahel (joon. 3), 2ϑ on mikroskoobi apertuurnurk. Valemi (4) tuletamisel on eeldatud, et kõige enam piirab mikroskoopi tulevat valguskiirte kimpu objektiivi raamistus.

Kui preparaati valgustada kondensoriga tekitatud koonduva kiirtekimbuga, siis lahutusvõime suureneb. Piirlahutus d on kaks korda väiksem (s.t. võime eristada 2 korda väiksemaid detaile); sel juhul

$$d = \frac{\lambda_0}{2 n \sin \vartheta} . \quad (5)$$

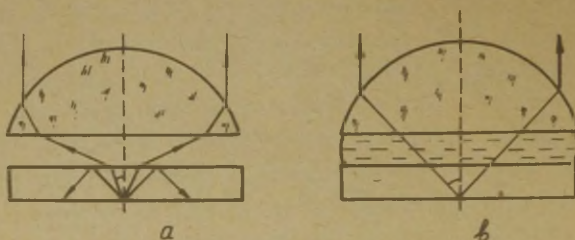


Joon. 3.

Lahutusvõime suurendamiseks võib kasutada väiksema lainepikkusega valgust, näiteks ultraviolettvalgust. Mikroskoobi optilised detailid valmistatakse sel juhul kvartsis, mis ei neela ultraviolettkiiri. Ultraviolettmikroskoobiga saadud kujutis kas fotografeeritakse või siis seda vaadeldakse okulaari tegeliku kujutise tasandisse paigutatud luminestseeruval ekraanil.

Teine võimalus lahutusvõime suurendamiseks on suurendada apertuurarvu. Selleks kasutatakse immersioonobjektiive. Need on sellised objektiivid, millede kasutamisel preparaadi katteklaasi ja objektiivi esimese läätse vaheline keskkond täidetakse vedelikuga (glütseriin, $n = 1,45$; monobroomnaftaliin, $n = 1,65$; seedripuuõli, $n = 1,515$ jt.), mille murdumisnäitaja on lähedane klaasi murdumisnäitajale.

Kiirte käik kuiva ja immersioonobjektiivis puhul on toodud joonisel 4.



Joon. 4. Kiirte käik kuivas ja immersioonobjektiivis.

Kui preparaadi katteklaasi ja objektiivi vahel on õhk (joon. 4,a), siis need kondensorist lahkuvad kiired, mis langevad katteklaasi ja õhu piirpinnale täieliku sisepeegelduse piirnurgast suurema nurga all, peegelduvad tagasi katteklaasi ja ei sattu objektiivi. Peegeldumine toimub ka objektiivi läätse eesmiselt pinnalt, kui kiirte langemisnurk objektiivile on küllalt suur.

Immersioonvedeliku puhul (joon, 4,b) levib valgus preparaadist objektiivini praktiliselt optiliselt homogeenses keskkonnas, mistõttu on võimalik töötada suurema valguskoonusega. Lahutusvõime ja ka kujutuse heledus tunduvalt suurenevad.

Kaasaegsete kuiva objektiiviga mikroskoopide apertuurarv on kuni 0,95. Immersioonobjektiivide puhul ($n = 1,5$) apertuurarv on $\approx 1,4$.

Visuaalsel vaatlemisel on oluline ka mikroskoobi kasuliku suurenduse mõiste. Mikroskoobi suurenduse valemist (2) näeme, et vähendades f_1 ja f_2 suureneb mikroskoobi suurendus. Praktikas kasutatakse harva suuremaid suurendusi kui 1500 - 2000. Alljärgnevalt vaatleme, miks see nii on.

Olgu eseme mõõt võrdne piirlahutusega d . Kui parima nägemise kaugusel kujutise suurus on d' , siis suurendus on

$$K = \frac{d'}{d}.$$

Valemist (5) saame, et

$$K = \frac{\Delta d'}{0,5 \lambda_0} \quad (6)$$

Nagu eespool mainitud, eristame normaalse silmaga piirjuhul objekti kaht sellist punkti, millede vaheline nurkkaugus on 1'.

Selleks, et mikroskoobiga oleks mugav töötada, peab kujutise vaatenurk asuma vahemikus 2' kuni 4'. Parima nägemise kauguselt vaatlemisel vastab see d' väärtustele 140 - 280 μm . Asendades need d' ja lainepikkuse $\lambda_0 = 0,555 \mu\text{m}$ väärtused valemisse (6) saame kasutamiseks sobiva suurenduste vahemiku

$$500A < K < 1000 A$$

Need suurendused, mis rahuldavad seda tingimust, on kasulikud, sest nende suurenduste puhul võime silmaga näha kõiki struktuuri üksikasju, mida mikroskoop kui optiline süsteem eristab. Asendades siia apertuurarvu väärtuse, mis kaasaegsetes immersioonobjektiiviga mikroskoopidel on kuni 1,4, saame suurenduse jaoks tingimuse

$$700 < K < 1400.$$

Suuremaid suurendusi nimetatakse kasututeks. Kasutu suurendus ei ole otstarbekas, sest sellega kaasneb aberratsioonide suurenemine ja väheneb vaatevälja valgustatus.

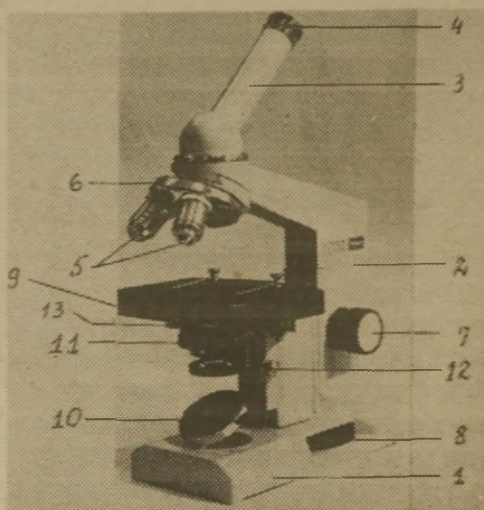
4. Mikroskoobi kirjeldus

Tööstus toodab vastavalt praktika vajadustele väga mitmesuguseid mikroskoobe. Käesolevas praktikumis tutvume lihtsa, väikese suurendusega mikroskoobiga ja bioloogilise mikroskoobiga "Biolam-C11" (üliõpilaste mõõtemikroskoop maksimaalse suurendusega 1500).

Iga mikroskoobi konstruktsioonis saab eristada mehaanilist ja optilist osa. Mikroskoobi mehaaniline osa koosneb statiivist, tuubusest, esemelauast ja valgustussüsteemi hoidjast (joon. 5). Statiiv toetub massiivsele alusele 1, mis tagab mikroskoobi püsivuse. Statiivi sammu 2 on kas liikumatult kinnitatud või on kallutatav, et oleks mugavam töötada.

Lihtsa mikroskoobi korral paigutame tuubuse 3 ühte otsa

okulaari 4, teise otsa kruvitakse objektiiv 5. Keerulisematel mikroskoopidel on tuubuse külge kinnitatud objektiivide revolver 6, mis sisaldab endas 2 - 4 objektiivi ja mille abil saab objektiive kiiresti vahetada. Selleks et iga objektiivi telg alati ühtiks mikroskoobi optilise teljega on revolvril seadeldis, mis fikseerib ta vastavates asendites. Tuubus tervikuna on hammaslati abil seotud sambaga. Tuubuse nihutamiseks on olemas nii jämeda kui ka peene fookuseerimise mehhanismid (nupud 7, 8). Esemelauale 9 asetatakse preparaat. Kaks lehtvedru suruvad preparaadi vastu esemelauda, selleks et vältida tema nihkumist vaatluste ajal.



Joon. 5. Mikroskoop "Biolam-C11".

Mikroskoobi optiline osa algab peeglist 10 (üks pool on tasane, teine nõgus), mis suunab valguse preparaadile. Keerulisematel mikroskoopidel on ka eriline läätsede süsteem - kondensor 11, mis suunab peeglist tuleva valguse tugevalt koonduva kiirtekimbuna objektile.

Kondensor (mikroskoobis C-11 kasutatakse kondensorit KOH-3) on liigutatav üles-alla nupu 12 abil.

Objektiiv - mikroskoobi tähtsaim osa kujutab endast

läätsede süsteemi ühtses raamis. Eesmine, nn. frontaalne e. pealääts määrab ära suurenduse, teiste läätsede ülesanne on kujutiste vigade vähendamine. Objektiivile on pealekirjutatud apertuurarv ja temaga saadav suurendus. Mikroskoobi C-11 kolme objektiivi suurendused ja apertuurarvud on vastavalt 8 x 0,20; 40 x 0,65 ja 90 x 1,25 (õli immersiooniga).

Okulaar koosneb harilikult kahest läätsest: ülemisest, silmapoolsest ja alumisest, mida nimetatakse kollektiiviks. Silmapoolne lääts ja kollektiiv asuvad teineteisest kaugusel, mis võrdub nende läätsede fookusekauguste summa poolväärtusega. Mõlemad läätsed asuvad lühikeses silindrilises torus, mis paigutatakse tuubuse ülemisse avasse.

Bioloogilise mikroskoobi kondensor KOH-3 on varustatud iirisdiaphragmaga 13 ja kõrvalepööratava läätsega, millist kasutatakse töötamisel väikese suurendusega ($3,5^x$ või 8^x) objektiividega. Komplektis olevat matklaasi või valgusfiltrit saab asetada kõrvalepööratavasse raami. Kondensor on vertikaalsuunas nihutatav spetsiaalse kruvi abil. Kondensori apertuur on maksimaalne äärmises ülemises asendis

A. MIKROSKOABI APERTUURARVU JA LAHUTUSVÕIME MÄÄRAMINE.

Tööülesanne

Määrata mikroskoobi suurendus ja apertuurarv, piirlahutus ja lahutusvõime.

Töövahendid

Lihtne mikroskoop, vertikaalne võrdlusskaala, poolläbi paistev peegel, 0,1 mm jaotistega skaala, väikese avaga plaadike, tükike skaalat 1 mm jaotistega, joonlaud.

Töö käik

1. Mikroskoobi suurenduse määramine

Suurenduse määramiseks kasutame lihtsat meetodit, mis annab häid tulemusi ainult väikeste suurenduste puhul. See tõttu kasutame katses lihtsa konstruktsiooniga mikroskoopi. Paigutame mikroskoobi tuubuse ülemisse otsa okulaari, tuubuse alumisse otsa kruvime objektiivi. Asetame esemelauale objekti - klaasplaadi, millele on kantud skaala 0,1 mm jaotistega. Peegli suuname valguse skaalale. Valgustamiseks kasutame kas loomulikku valgust või spetsiaalset valgustit. Nihutame tuubust fokuseerimise käepideme abil kuni skaala kriipsud on mikroskoobis teravalt nähtavad. Asetame mikroskoobi kõrvale parima nägemise kaugusele (25 cm) mikroskoobi teljest vertikaalse võrdlusskaala (skaala jaotised on 1 mm). Mikroskoobi okulaari peale paneme mikroskoobi teljega 45° -se nurga all oleva poolläbipaistva peegli. Peegel võimaldab üheaegselt vaadelda aluslaua asetsevat skaalat ja kõrvalasetsevat vertikaalset skaalat. Aluslaua asetsevat skaalat tuleb nihutada, kuni mõlemate skaalade kujutised kattuvad. Mõlemad skaalad peavad olema enam-vähem ühesuguse valgustatusega, vajaduse korral muudame peegli kallet.

Loendame, mitu võrdlusskaala jaotist n_1 vastab mikroskoobis nähtava skaala jaotiste arvule n_2 . Kuna võrdlusskaala jaotis on aluslaua oleva skaala jaotistest 10 korda suurem, siis võime kirjutada

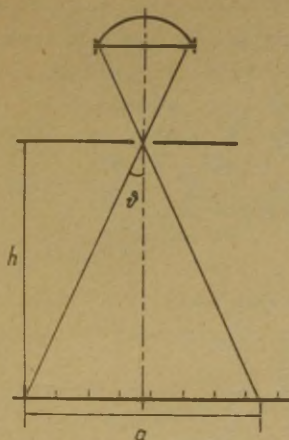
$$K = \frac{n_1}{n_2} 10.$$

2. Apertuurarvu ja lahutusvõime määramine

Apertuurarvu määramiseks kasutame ka lihtsat meetodit, mis on sobiv ainult väikeste suurendustega mikroskoopide puhul.

Kõigepealt määrame apertuurnurga (vt. joonis 6). Asetame aluslauale väikese avaga plaadikese ja teravustame mik-

roskoobi avale (vajaduse korral nihutame plaadikest nii, et ava kujutis oleks vaatevälja keskel).



Joon.6. Apertuurnurga määramine.

Pöörame valgustava peegli horisontaalseks ja asetame tema peale plastmassist skaala hästi teravate skaala joontega (skaala jaotised on 1 mm). Valgustame skaalat tugevasti. Ettevaatlikult, et mitte rikkuda kujutise teravust, eemaldame okulaari. Vaadates palja silmaga tuubusesse, püüame näha skaala teravat kujutist. Loetleme nähtud jaotiste arvu ja arvutame kogu nähtud skaala lõigu pikkuse a (vaata joon. 6). Joonlaua abil määrame kauguse h peeglil asuvalt skaalalt kuni avaga plaadini. Leiame $\operatorname{tg} \bar{\nu} = \frac{0,5a}{h}$. Maataviliste tabelite või arvuti abil leiame $\bar{\nu}$ ja $\sin \bar{\nu}$.

Kuiva objektiivi puhul $n = 1$ ja mikroskoobi apertuurarv võrdub

$$A = \sin \bar{\nu}$$

Arvutame mikroskoobi piirlahutuse d . Kui preparaati valgustatakse koonduva kiirtekimbuga (kondensor), siis leiame d valemi (5) abil, kui valgustatakse paralleelse kiirtekimbuga, siis kasutame valemit (4). Võtame $\lambda_0 = 0,55 \mu\text{m}$. Leiame ka lahutusvõime $1/d$.

Kõik mõõtmistulemused ja arvutused kanname protokolli.

Lisaküsimusi

1. Konstrueerige eseme kujutis silma võrkkestal, kui ese asub luubi (koondava lääts) fokaaltasandis.

2. Kuidas oleneb õhukese lääts fookuskaugus lääts pindade kõverusraadiustest ja keskkondade murdumisnäitajatest?

3. Kas on võimalik kasutada mikroskoopi mikroobjektide fotografeerimiseks?

4. Miks ultraviolettkiirte kasutamise korral eseme kujutist jälgitakse luminestseeruvale ekraanil (või siis fotografeeritakse)?

5. Millise kiirtekimbuga valgustasite teie preparaati antud katses?

B. OBJEKTI MÕÖTMETE MÄÄRAMINE MIKROSKOOBIGA.

Tööülesanne

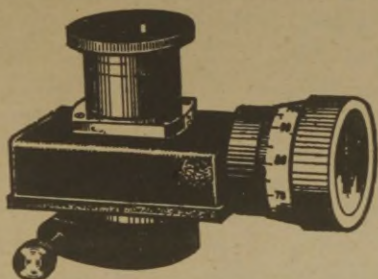
Gradueerida okulaarmikromeetri skaala. Mõõta juuksekarva diameeter.

Töövahendid

Bioloogiline mikroskoop C-11, okulaarmikromeeter MOB, objektmikromeeter OM , uuritav preparaat.

Katseseade

Objekti lineaarmõõtmete määramiseks kasutame mikroskoopi C-11 koos okulaarmikromeetriga MOB. Okulaarmikromeetri (vt. joon. 7) sees asub jaotistega skaala ja raamitud klaasplaat, mida saab nihutada mikromeetrilise kruviga. Plaadile



Joon. 7. Okulaarmikromeeter.

on kantud kaldrist ja kaksikkriips, mille suund on risti plaadi nihutamise suunaga. Pöörates trumlit, nihutame klaasplaati liikumatu skaala suhtes. Trumli ühele täispöördele vastab kaksikkriipsu nihe 1 mm võrra. Trumlil on 100 jaotist, seega trumli ühele jaotisele vastab kaksikkriipsu nihe 0,01 mm. Liikumatu skaala on abiskaala, ta võimaldab loendada trumli täispöördedeid. Komplekti (mikroskoop C-11 koos okulaarmikromeetriga MOB) optiline süsteem on konstrueeritud nii, et vaadeldava objekti kujutis tekib abiskaala tasandis.

Olenevalt mõõdetavast objektist kasutame kas kaksikkriipsu või kaldristi.

Kui mõõdame ümmarguse objekti diameetrit, siis on soovitatav seadistada kaksikkriipsu üks joontest puutujaks objekti piirjoonele.

Kui kujutise äärteks on sirged, mis on risti mikromeetri teljega, siis määrame nende äärte asendid kaksikkriipsu joontevahelise keskkoha järgi, sest inimsilm hindab mingi joone kauguste võrdsust kahest lähedalolevast joonest täpsmini kui kahe joone kattumist.

Kaldristi kasutatakse selliste sirglõikude mõõtmisel, mis on kaldu kaksikkriipsu suhtes.

Okulaarmikromeeter paigutatakse tuubusele okulaari asemele ja kinnitatakse kruviga. Mõõtmiseks nihutame liikuval

plaadil olevat märki (kaksikkriipsu või kaldristi) kujutise ühest äärmisest punktist teise ja määrame selliselt kujutise mõõtmise okulaarmikromeetri skaalajaotistes. Mikromeeterkruvi tühikäigust (kruvilõtkust) tingitud vea vältimiseks tuleb märki mõlemale ülalmainitud punktile lähendada, pöörates trumlit kella osuti liikumise suunas.

Oletame, et kujutise mõõtmisel saame äärmiste punktide vahekauguseks N' okulaarmikromeetri skaalajaotist, s.t. arvu N' trumlile kantud skaala jaotist.

Objekti vastava mõõtmise määramiseks toimime alljärgnevalt. Uuritava objekti asemele paneme nüüd esemelauale objektmikromeetri OM. Objektmikromeeter on 100 jaotisega skaala, mis on kantud katteklasaasiga kaetud klaasplaadikesele. Klaasplaadike on liimitud terasraamis olevale avale. OM skaala jaotise väärtus on 0,01 mm. Skaala joonte laius on 0,002 ± 0,001 mm. Jaotiste lugemisel tuleb arvestada pikkusi kas kriipsude samapoolsetest äärtest või keskelt. Ühe jaotise lubatud viga on 1 μm, 10 jaotise viga on 2 μm, 100 jaotise viga - 3 μm.

Määrame nüüd okulaarmikromeetri ühe jaotise väärtuse. Loendame okulaarmikromeetri skaala jaotiste arvu N , mis vastab objektmikromeetri skaalalõigule l . Okulaarmikromeetri jaotise väärtus $a = \frac{l}{N}$ (l - väljendame mm-tes). Niiviisi määratud okulaarmikromeetri jaotise väärtus kehtib ainult selle objektiliivi jaoks, millisega me mõõtmisi tegime.

Objekti lineaarmõõtmise x arvutame valemist

$$x = aN'$$

või

$$x = l \frac{N'}{N}.$$

Töö käik

Enne mõõtmisi tuleb tutvuda põhjalikult mikroskoobi kõikide osadega ja kõikide käsitlemisnuppudega. Optilisi klaaspindu mitte puutuda kätega!

1. Tõstame mikroskoobi revolvri jamefokuseerimise kruvi 7 abil võimalikult kõrgele, et oleks mugav sisse keerata

objektiivi. Kasutama objektiivi 8 x 0,20. Pöörame revolvr - rit, kuni kuuleme nõrka klõpsu, siis teame et objektiivi telg uhtib mikroskoobi optilise teljega. Kinnitame mikroskoobi tuubusele okulaarmikromeetri. Esemeks võtame juuksekarva tükikese. Juuksetükike on asetatud alusklaasile ja kaetud katteklaasiga. Asetame preparaadi esemelauale.

Preparaadi valgustamiseks kasutatakse kas loomulikku valgust või valgustit (toide vahelduvvoolu võrgust pingega 220 V). Valguse suunamine kondensorile peegli abil. Kasutame peegli tasast poolt.

2. Leiame juuksekarva kujutise mikroskoobis. Selleks tuleb nihutada klaaside vahel olevat juuksekarva, kuni ta satub objektiivi alla. Lähendame objektiivi ettevaatlikult 1 - 2 mm kaugusele preparaadist jämfokuseerimise kruvi abil. Seejärel pöörame aeglaselt peenfokuseerimise kruvi, kuni leiame kujutise. Kui me ei leia kujutist selle kruvi pööramisel terve täispöörde võrra, siis tuleb nihutada objektiivi veidi üles- või allapoole ja seejärel uuesti keerata peenfokuseerimise kruvi, kuni leiame kujutise. Pidage meeles, et fokuseerimiskruvide pööramisel kellaosuti liikumise suunas tuubus nihkub alla, vastupidises suunas kruvisid pöörates - üles.

Olge ettevaatlikud, ärge suruge objektiivi vastu preparaati! Kokkupuude preparaadi katteklaasiga rikub väärtuslikku objektiivi.

Peenfokuseerimise kruvi täispööre nihutab tuubust 0,1 mm võrra. Kui juuksekarv ei sattu mikroskoobi vaatevälja, siis teravustame mikroskoobi katteklaasil olevatele kriimustustele või tolmutükikestele. Seejärel nihutame preparaati kuni juuksekarv satub mikroskoobi vaatevälja ja on paralleelselt okulaarmikromeetri kaksikkriipsuga. Kinnitame preparaadi vedruklambri abil. Täpsustame preparaadi teravust ja pöörates peeglit valime sobiva valgustuse.

3. Määrame juukse diameetri okulaarkruviku skaalaühikutega N'. Kasutame kas kaksikkriipsu või kaldristi, lähtudes eespoolmainitud näpunäidetest.

4. Tõstame üles mikroskoobi revolvr ja paneme preparaadi

asemele aluslauale objektmikromeetri OM. Arvestades eespool kirjeldatud ettevaatusabinõusid, leiame mikroskaala kujutise. Gradueerime okulaarmikromeetri skaala (võtame võimalikult suure lõigu ℓ).

5. Arvutame juuksekarva diameetri millimeetrites.

6. Määrame mõõtmiste vea arvestades, et jaotiste arvu N (ja N') määramise viga on 0,5 jaotist. Lõigu ℓ lubatud viga on toodud eespool.

Lisaküsimusi ja ülesandeid

1. Konstrueerige kiirte käik lihtsas mikroskoobis.
2. Leidke suuruse x vea arvutamise valem.
3. Miks on kasulik kasutada mikroskaala võimalikult suurt lõiku ℓ ?
4. Milline on mikroskoobi suurendus antud objektiivi puhul?

Kirjandus

1. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики. М., 1982, с. 329 - 346.
2. Ливенцев Н.М. Курс физики. I. М., 1978, с. 257 - 279.
3. Saveljev, I. Füüsika üldkursus. 3. Tln., 1979, lk.42-45, 46 - 49.

VEDELIKU MURDUMISNÄITAJA MÄÄRAMINE ABBE REFRAKTOMEETRIGA

Tööülesanne

Tutvuda Abbe refraktomeetri ehituse ja tööpõhimõttega. Määrata murdumisnäitaja sõltuvus lahuse kontsentratsioonist. Leida tundmatu lahuse kontsentratsioon.

Töövahendid

Abbe refraktomeeter, uuritavad lahused, destilleeritud vesi, pulk lahuse viimiseks prismale, tükike vatti.

Sissejuhatus

1. Valguskiirte murdumine

Ühest keskkonnast teise üle minnes muudab valguskiir keskkondade piiril oma levimissuunda ehk murdub. Murdumiseaduse järgi asub murdunud kiir OB (joon. 1) ühes tasandis langeva kiire AO ja langemispunktist tõmmatud keskkondade eralduspinna pinnanormaaliga ON. Langemisenurga α siinuse suhe murdumisenurga β siinusesse on antud ainetepaari jaoks konstantne suurus:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12}. \quad (1)$$

Suurust n_{12} nimetatakse teise aine (see, millesse kiir läheb) suhteliseks murdumisnäitajaks esimese aine suhtes.

Mingi aine murdumisnäitajat vaakumi suhtes nimetatakse selle aine absoluutseks murdumisnäitajaks^{*}. Võib tõestada,

^{*} Sõna "absoluutne" jäetakse tihti ära ja siis räägitakse lihtsalt antud aine murdumisnäitajast, pidades silmas, et ta on määratud vaakumi suhtes.

et kahe aine suhteline murdumisnäitaja võrdub nende absoluutsete murdumisnäitajate suhtega. Kui esimese ja teise aine absoluutsed murdumisnäitajad on n_1 ja n_2 , siis on teise aine suhteline murdumisnäitaja esimese suhtes

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Praktikas mõõdetakse väga tihti (ja see on otstarbekas) aine murdumisnäitaja õhu suhtes. Absoluutsed murdumisnäitajad on viimastest umbes 1,0003 korda suuremad. Tabelites on harilikult esitatud absoluutsed murdumisnäitajad.

Suurema murdumisnäitajaga aineid nimetatakse optiliselt tihedamateks.

Vaatleme valguskiire üleminekut optiliselt hõredamast aineist optiliselt tihedamasse (joon. 1). Ülaesitatud kahest valemist järeldeb vahetult, et sellisel juhul on murdumisnurk väiksem langemisnurgast. Suurim murdumisnurk β_m vastab langemisnurgale 90° . Joonisel 1 on kujutatud vasta-va kiire käik joontega $A'O$ ja OB' . Valemite (1) ja (2) põhjal ja arvestades, et $\alpha_m = 90^\circ$, võime kirjutada

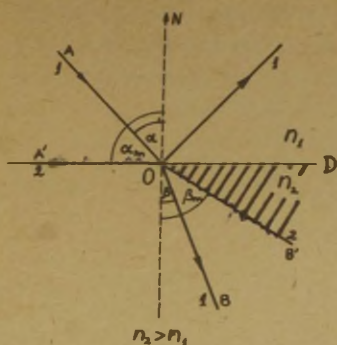
$$\sin \beta_m = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3)$$

Kui valgus langeb kahe keskkonna lahutuspinnale optiliselt tihedama keskkonna poolt, siis murdumisnurk β on alati suurem langemisnurgast α (joon. 2). Nurgale $\alpha = \alpha_m$ vastab murdumisnurk $\beta_m = 90^\circ$. Kui langemisnurk $\alpha > \alpha_m$, siis valgus peegeldub täielikult tagasi optiliselt tihedamasse keskkonda. Seda nähtust nimetatakse täielikuks sisepeegelduseks. Viimasel juhul kehtib seos

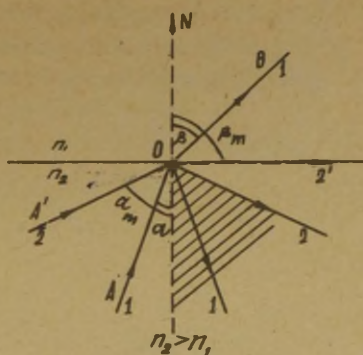
$$\sin \alpha_m = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3')$$

Kui mõõta nurk β_m või α_m , saame arvutada murdumisnäitaja n_{12} , ja kui ühe keskkonna absoluutne murdumisnäitaja n_2 on teada, saame leida ka teise keskkonna absoluutse murdumisnäitaja n_1 .

Kiudoptika põhineb täieliku sisepeegelduse nähtuse kasutamisel. Valgus, sattudes läbipaistva kiu sisse, mis asub



Joon.1. Kiirte murdumine optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse.



Joon.2. Valguse murdumine optiliselt tihedamast keskkonnast optiliselt hõredamasse.

väiksemat murdumisnäitajat omavas keskkonnas, peegeldub mitmekordselt ja levib piki seda kiudu. Üksikute kiududest koostatakse valgusjuht, milles erineva heledusega osadest koosnev kujutis võib olla edasi antud mõõda kõverjoonelist trajektoori (joon. 3).



Joon. 3. Valguse levimine kius.

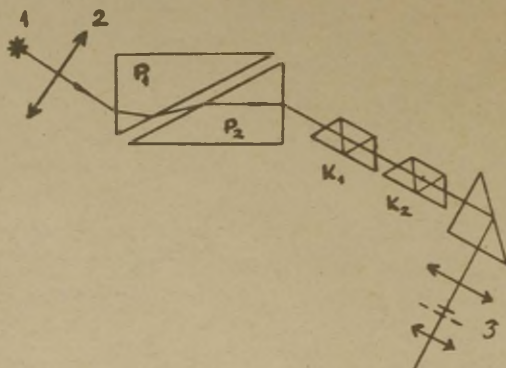
Valgusjuhte kasutatakse meditsiinitehnikas (näiteks endoskoobis - seadmes keha siseõõnsuste vaatlemiseks - ja gastroskoobis, mille abil tehakse diagnostilise otstarbega fotosid).

Murdumise piirnurga mõõtmisel ja täieliku sisepeegelduse nähtuse ärakasutamisel põhineb refraktomeetrite töö. Need on seadmed murdumisnäitaja määramiseks. Meditsiinis kasutatakse refraktomeetreid sinete kontsentratsiooni mää-

ramiseks lahustes (näiteks valgu määramiseks vere seerumis), mis on võimalik seetõttu, et lahuse murdumisnäitaja sõltub temas sisalduva lahustatud aine kontsentratsioonist.

2. Abbe refraktomeetri ehitus ja tööpõhimõte

Abbé refraktomeetri põhilisteks osadeks on kaks prisma (p_1 ja p_2) ja pikksilm (joon. 4).



Joon. 4. Abbe refraktomeetri skeem.

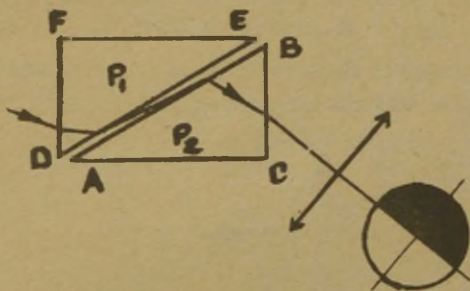
1 - valgusallikas, 2 - kondensor, p_2 - mõõteprisma, p_1 - valgustav prisma, k_1 ja k_2 - kompensatori otsevaate prisma, 3 - niitristiga varustatud pikksilm.

Prisma p_2 nimetatakse mõõteprismaks. Ta on valmistatud raskest flindist, mille murdumisnäitaja on $\approx 1,74$. Mõõteprisma tahud, mis on pööratud pikksilma ja prisma p_1 poole (viimast nimetatakse sisendtahuks), on hoolikalt poleeritud. Prisma p_1 nimetatakse valgustavaks prismaks. Tema tahk, mis on pööratud prisma p_2 poole, on mateeritud. Valgustava prisma klaasi sort ei oma tähtsust.

Uuritav vedelik paigutatakse prismade vahele, kus ta moodustab õhukese tasaparalleelse kihi. Valgus suunatakse Abbé refraktomeetrisse läbi valgustava prisma (poleeritud) otsatahu (libiseva kiire meetod). Valgustava prisma mateeritud pinnalt levib valgus vedelikku kõikides suundades. Läbinud uuritava vedeliku õhukese kihi, langeb valgus mõõ-

teprisma sisendtahule igasuguste nurkade all vahemikus 0° kuni 90° . Mõõteprisma on murdunud kiirte murdumisnurgad vastavalt 0° kuni kindla piirnurgani. See murdumise piirnurk, nagu selgus ülalpool, on määratud prisma ja uuritava vedeliku murdumisnäitajatega. Valgustamata nurga tekkimiseks peab mõõteprisma optiline tihedus olema uuritava vedeliku omast suurem. Mõõteprismast väljumisel murduvad kiired veel kord ja suunduvad siis lõpmatusse teravustatud pikksilma (joon. 4).

Kui pikksilm on asetatud nii, et tema optilise telje suund langeb ühte mõõteprisma piirnurga all murdunud kiirte suunaga, siis on üks pool vaateväljast valgustatud, aga teine pool on pime (vt. joon. 5). Soovitame üliõpilastel tõestada seda üksikasjaliku kiirte käigu konstrueerimisega Abbé refraktomeetris.

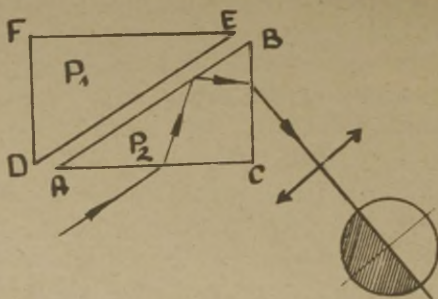


Joon.5. Kiirte käik Abbe refraktomeetri mõõtepeas libiseva kiire meetodil.

Ühe vedeliku asendamisel teisega muutub ka murdumise piirnurk. Selleks et taastada iga kord endine pilt okulaa-ris (pool vaatevälja hele ja pool tume), on vaja iga kord uuesti pikksilma telje suund viia ühte mõõteprismas murdu-mise piirnurga all murdunud kiirte suunaga. Seega saab pikk-silma ja prisma vastastikuse asendi põhjal otsustada uuri-tava vedeliku murdumisnäitaja üle.

Murdumisnäitaja määramiseks on Abbé refraktomeetri pikk-silmas niitrist, mis võimaldab fikseerida okulaa-ris nähta-va heleda ja tumeda välja piiri asukoha, ning pikksilma ja

prisma vastastikust asendit näitav skaala, mis on gradueeritud vahetult murdumisnäitaja ühikutes. Kui mõõta murdumisnäitajat täieliku sisepeegeldumise meetodil (vt. joon.6), valgustatakse mõõteprismat p_2 tema matilt küljelt AC.



Joon.6. Murdumisnäitaja mõõtmine täieliku sisepeegeldumise meetodil.

Sel juhul langeb valgus mõõteprisma poleeritud küljele AB kõikvõimalike nurkade all vahemikus $0 - 90^\circ$. Kui lange misnurk $\alpha > \alpha_m$, toimub täielik sisepeegeldumine, kui aga $\alpha < \alpha_m$, siis osaline peegeldumine. Pikksilmas on sel juhul näha heleda osa ja poolvarju piir. Kuna piirnurga jaoks keh tivad seosed on mõlemal mõõtmismeetodil ühesugused, siis asub ka see piir samas kohas. Täieliku sisepeegeldumise meetodil on võimalik mõõta ka läbipaistmatute ainete mur dumisnäitajaid.

Ülalesitatud Abbe refraktomeetri tööpõhimõtte kirjeldus vastab sellele juhule, kui kasutatakse monokromaatilist val gust. Mittemonokromaatilise valguse kasutamise korral (pae vavalgus) on pikksilma vaateväljas nähtava heleda ja tumeda vaateväljapoole eralduspiir värvunud. See nähtus on tingitud sellest, et nii uuritava vedeliku kui ka mõõteprisma mater jali murdumisnäitajad sõltuvad valguse lainepikkusest.

Seepärast kasutatakse Abbe refraktomeetris dispersiooni kompensaatorit, mis võimaldab mõõtmistel kasutada mittemono kromaatilist valgust. Dispersiooni kompensaator koosneb kahest otsevaate prismast. Kumbki otsevaate prisma koosneb kolmest kokkukleebitud prismast, mis on valitud nii, etkol-

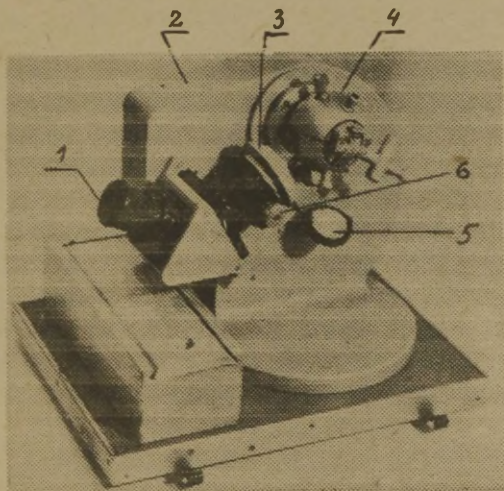
lased kiired läbivad süsteemi ilma suunda muutmata. Suuremate lainepikkustega valgus aga kaldub kõrvale ühele poole, väiksemate lainepikkustega valgus teisele poole (kollaste kiirte suhtes). Seega otsevaate prismad lahutavad valguse spektriks.

Trumli 6 (joon. 7) abil saab pöörata üheaegselt mõlemat prisma vastupidistes suundades. Kogu kompensatori summaarne nurkdispersioon muutub, kuna ta koosneb mõlema otsevaate prisma dispersioonist. Ta läbib kõik väärtused vahemikus maksimaalsest positiivsest suuruselt kuni vastava negatiivse suuruseni. Dispersiooni täieliku kompensatsiooni korral on valguse ja varju piir värvitu ja tema asend ühtib kollase valguse poolt moodustatud piiri asendiga.

Töö käik

1. Refraktomeetri ИРФ-22 kirjeldus ja temaga töötamine.

Refraktomeetri ИРФ-22 välisvaade on toodud joonistel 7 ja 8.



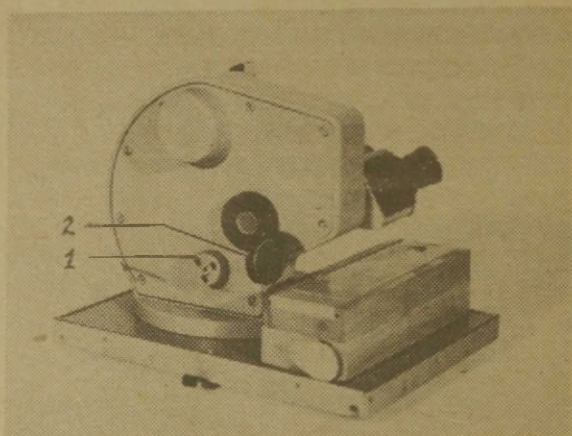
Joon. 7. Refraktomeeter ИРФ-22.

1 - pikksilm, 2 - korpus, 3 - kompensatori trummel skaalaga, 4-mõõtepea, 5-peegel, 6-kompensatori trumli nupp.

Seadme korpusele 2 (joon.7) monteeritud mõõtepea 4 koosneb kahest valatud poolkerast, milles asuvad mõõte- ja valgustav prisma.

Mõõtepea on jälgelt ühendatud aparaaadi korpuse sees asuva skaalaga.

Et leida valgustatud ja valgustamata vaatevälja osa eralduspiir ja viia see niitristini vaateväljas, on vaja trumli 1 (joon. 8) keeramisega kallutada mõõtepead kuni vajaliku asendini. Trumliga 6 (joon. 7) saab keerata kompensatori prismaid ja kõrvaldada eralduspiiri värvilise riba. Ühes kompensatoriga pöörleb skaalaga trummel 3, mille järgi määratakse kompensatori asend.



Joon. 8. Refraktomeeter ИРФ-22.

1 - trummel mõõtepea asendi muutmiseks, 2 - peegel skaala valgustamiseks.

Uuritavale ainele juhitakse valgus peegligna 5 (joon.7), aga murdumisnäitaja skaalale peegligna 2 (joon. 8).

Mõõtmiste teostamiseks avame mõõtepea. Mõõteprisma pinnale kanname puupulgaga mõne tilga uuritavat vedelikku ja suleme ettevaatlikult mõõtepea. Läbi akna (joon. 7) vaatame, kas uuritav vedelik täitis täielikult mõõteprisma ja valgustava prisma vahelise pilu. (Joonisel 7 ei ole see aken

vahetult nähtav. Teda varjab mõõtepea kumerus.)

Valgustava peegli 5 asetame nii, et valgus langeks läbi akna 4 valgustavasse prismasse ja valgustaks vaatevälja ühtlaselt.

Nüüd teravustame okulaari nihutamisega niitristi ning seejärel leiame valguse ja varju eralduspiiri, pöörates trumlit 1 (joon. 8). Trumliga 6 (joon. 7) kõrvaldame värvilise vöödi valguse ja varju eralduspiiril. Seejärel viime valguse ja varju eralduspiiri täpselt ühte niitristiga ja registreerime riista näidu (on nähtav okulaaris vasakul pool). Murdumisnäitaja täis-, kümnendik-, sajandik- ja tuhandikosad loetakse vahetult skaalalt, kümnetuhandikud hinnatakse silmaga. Refraktomeetri skaalalt me loeme vahetult murdumisnäitaja, mis vastab naatriumi D joonele ($\lambda_D = 589 \text{ nm}$). Murdumisnäitaja skaala on kehtiv temperatuuril 20° C .

Kui mõõtmisi tehakse 20° C -st erineval temperatuuril, ning mõõta tuleb suure täpsusega, siis tuleb refraktomeetri ИРФ-22 skaala näidule liita

$$\delta = 0,073 (t-20) \cdot 10^{-4}.$$

Seda valemit võib kasutada temperatuurivahemikus 5° kuni 35° C . Refraktomeeter ИРФ-22 võimaldab mõõta murdumisnäitajat piirkonnas 1,3 - 1,7 täpsusega $\pm 2 \cdot 10^{-4}$.

2. Mõõtmised.

Antud töös on vaja mõõta vee ja juhendaja poolt määratud nelja tuntud ja ühe tundmatu kontsentratsiooniga lahuse murdumisnäitajad. Enne iga mõõtmist tuleb mõlemad prismad mõõtepeas puhastada destilleeritud vees niisutatud vatitükiga ja seejärel kuivatada. Seejuures on vaja meeles pidada, et prisma materjal (flint) on pehme ja kergesti kriimustatav.

Iga vedeliku puhul viime valguse ja varju piiri niitristi keskele neli korda, kaotades iga kord värvilise vöödi. Seejuures on vaja pooled mõõtmised teostada kompensatori ühes asendis ja pooled asendis, mis on sümmeetriiline kompensatori O° -lugemi suhtes. Mõõtmistulemused kanname otsekohe varem ettevalmistatud tabelisse. Arvutame ja kirjutame tabelisse ka murdumisnäitajate keskmised väärtused \bar{n}_D iga

lahuse puhul.

Lahuse kontsentratsioon	Mõõtmiste jrk.nr.	n_D	\bar{n}_D
. . .	1
	2	. . .	
	3	. . .	
	4	. . .	
. . .	1
	2	. . .	
	.		
	.		

Pärast arvutusi kujutame graafikul lahuse murdumisnäitaja sõltuvuse lahuse kontsentratsioonist. Tuleb valida mõistlik graafiku mastaap. Kasutades sõltuvuse $n_D = n_D(C)$ graafikut, määrame tundmatu lahuse kontsentratsiooni.

Küsimusi

1. Milline on piirnurga väärtus valguskiire üleminekul veest klaasi ($n_{H_2O} = 1,33$, $n_{klaas} = 1,512$)?
2. Sõnastage valguse peegeldumise seadused.
3. Kui suur on valguse levimiskiirus vaakumis?
4. Kuidas muutub valguse lainepikkus üleminekul optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse?
5. Milliste optiliste riistade töö põhineb aine dispersiooni kasutamisel?
6. Millega on ära määratud värvuste järjekord spektris?

Kirjandus

1. Ливенцев Н.М. Курс физики. I. - М.: Высшая школа, 1974, с. 228 - 236.
2. Ремизов А.М. Курс физики, электроники и кибернетики. М., 1982, с. 347 - 351.
3. Saveljev, I. Füüsika üldkursus. 3. Tln., 1979, lk. 3-5, 8 - 11, 175 - 176.

Tööülesanne

Tutvuda optilise kiirguse mõistega, optiliste kiirgusspektrite liikidega, erinevate valgusallikate kiirguse spektraalse koostisega, spektraalriistade ehitusega ja nende karakteristikutega. Koostada spektroskoobi gradueerimiskõver. Määrata selle põhjal tundmatu aine spektrijoonte lainepikkused.

Töövahendid

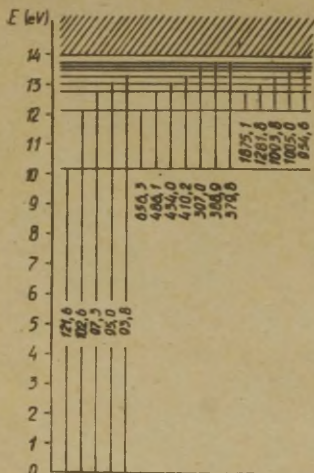
Monokromaator YM -2, spektraallambid ja -torud koos toiteseadmetega, spektrijoonte tabelid.

Teoreetiline sissejuhatus

1. Valguskiirguse tekkimine. Spektri mõiste ja spektrite liigid.

Käesolevas töös tutvume põgusalt optiliste kiirgusspektritega ja nende jälgimiseks kasutatavate seadmetega. Optiline kiirgus, mis hõlmab elektromagnetlainete skaalas ultravioletse, nähtava ja lähedase infrapunase osa (lainepikkuste vahemikud 10^{-8} - $4 \cdot 10^{-7}$ - $8 \cdot 10^{-7}$ - $2,5 \cdot 10^{-6}$ m), tekib aatomis (või ioonis) valentselektronide üleminekul suurema energiaga ergastatud tasemetelt väiksema energiaga tasemetele. Vabaneva kiirguskvandi (footoni) energia Plancki valemiga kohaselt võrdub alg- ja lõpptaseme energiatega: $h\nu = E_2 - E_1$, kus h on Plancki konstant ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s) ja ν - kiirguse sagedus. Vaatleme näitena kiirguse

tekkimist vesiniku aatomis. Joonisel 1 on esitatud elektroni energiatasemete skeem vesiniku aatomis, kus nulltasemeks on valitud elektroni põhioleku energia. Vertikaalsed jooned energiatasemete vahel tähistavad elektronide üleminekuid ja nende juurde kirjutatud numbrid vabaneva kiirguse lainepikkust nanomeetrites. Kiirguse monokromaatsete (sama lainepikkusega) komponentide kogumit nimetatakse spektriks. Spektrit iseloomustab tema kuju, mis näitab, kui suur on nende komponentide suhteline intensiivsus.

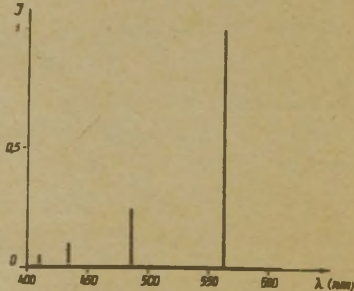


Joon.1. Vesiniku energiatasemete skeem.

sete üleminekute tõenäosusest. γ

Täpsemad mõõtmised näitavad, et spektrijoontel on siiski lõplik laius, mis oleneb kiirgavate aatomite liikumisolekust ja omavahelisest vastasmõjust. Vabades, üksteist vähe mõjutavates aatomites tekkinud kiirguse spektrid, nn. aatomspektrid,

Toodud näite korral on tekkinud kiirguse spektril spetsiifiline kuju. Graafikul, mis esitab kiirguse intensiivsuse sõltuvust lainepikkusest, esinevad vaid kitsad vertikaalsed jooned, mis on lahutatud aladega, kus intensiivsus on null. Sellist spektrit nimetatakse joonspektriks. Joonisel 2 on joonspektri näitena toodud intensiivsuse jaotus vesiniku spektri nähtavas osas, kusjuures kõige tugevama joone intensiivsus on võetud võrdseks ühega. Joonte suhteline intensiivsus sõltub vastavate elektroon-



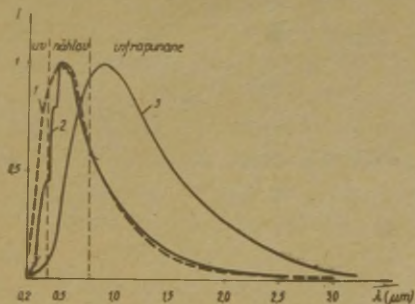
Joon.2. Balmeri seeria nähtava osa graafik.

on alati joonspektrid, sest aatomites võivad elektronid omada vaid diskreetseid energia väärtusi. Seejuures igal elemendil on ainult temale iseloomulik spekter.

Kui aatomid ühinevad molekulideks, lisanduvad tunduvalt keerulisemaks muutunud struktuuriga elektroonsetele energiatasemetele veel täiendavalt aatomite võnkumise ja molekuli kui terviku pöörlemise energiatasemed. Selle tulemusena on ka spektrite struktuur keeruline. Vabade molekulide spektrid, nn. molekulspektrid, kujutavad endast kitsamaid või laiemaid ribasid, mis koosnevad tihedasti üksteise kõrval asuvatest, osaliselt kattuvatest joontest. Molekulspektrite struktuur on iseloomulik igale ainele.

Vedelas ja tahkes aines tekivad aatomite omavahelise vastasmõju tõttu diskreetsete energiatasemete asemele laiad üksteisega osaliselt kattuvad tsoonid, mistõttu hõõguvate vedelate ja tahkete ainete spektrid on pidevad.

Pideva spektri näitena on joonisel 3 toodud intensiivsuse jaotused: 1 - absoluutselt musta keha spektris ($T = 6000 \text{ K}$), 2 - päikese spektris (maapinnal mõõdetuna) ja 3 - hõõglambi spektris ($T = 3000 \text{ K}$).



Joon. 3. Päikese ja hõõglambi spektrid.

Spektraalse jaotuse erinevuse paremaks esiletoomiseks on kõigil kolmel juhul spektri maksimumile vastavad intensiivsused normeeritud võrdseks ühega.

Kiirgusenergia spektraalse jaotuse tundmine on meile tähtis kahest aspektist:

1. Spektrijoonte lainepikkuste ja nende intensiivsuste

järgi on võimalik määrata aine koostisse kuuluvaid elemente ja ka nende kontsentratsiooni (kvalitatiivne ja kvantitatiivne spektraalanalüüs). Kuna spektraalanalüüsi saab teostada vaid aatomispektri järgi, siis analüüsiks vajaliku kiirguse saamiseks peab uuritava objekti viima gaasilisse olekusse (aurustama). Tekkinud aurud tuleb kuumutada sellise temperatuurini (1000 - 10 000 K), et nende siseenergiast piisaks aatomite ergastamiseks. Selleks kasutatakse tavaliselt kaarleeki, gaasileeki ja gaaslahendustoru.

2. Mitmesuguste valgusallikate kasutamisel on tarvis tunda nende spektreid. Näiteks töökoha valgustamisel kasutatava valguse spekter peaks olema võimalikult lähedane päikese valguse omale, millega inimese silm on kõige paremini kohanenud. Jooniselt 3 näeme, et hõõglamp sellele nõudele ei vasta.

Laboratoorses uurimistöös ja praktikas vajatakse väga mitmesuguse spektraalse koostisega valgusallikaid. Levinumad on mitmesugused lambid, milles tekitatakse gaaslahendus sobiva elemendi keskkonnas. Enam kasutamist leiavad Hg, H, Xe, Na, Cd sisaldavad gaaslahenduslambid. Nende kiirguse spekter on määratud vastavate elementide aatomispektritega.

Vaatleme lähemalt elavhõbedalampe, mida käesolevas töös põhiliselt kasutame. Toru- või kerakujulisse elektrodidega varustatud kvartskolbi on viidud tilgake elavhõbedat ja süütamise hõlbustamiseks mõnesugust inertgaasi (sellest tingituna esineb mõne Hg-lambi spektris jooni, mis ei kuulu elavhõbedale). Elektrodide pingestamisel tekib lahendus, Hg-tilgake aurustub ning mõne minuti jooksul kujuneb välja intensiivne kaarlahendus Hg-aurudes. Joonte laius ja nende suhteline intensiivsus spektris sõltuvad oluliselt elavhõbedaauru rõhust. Sellest olenevalt eristatakse madal-, kõrg- ja ülikõrgrõhu Hg-lampe.

Madalrõhulampides (Hg-auru rõhk 0,01 - 1 mmHg) on kiirgusenergia koondunud kitsastesse joontesse, kusjuures ligi 70 % kogu energiast on joones lainepikkusega 254 nm. Neid, nn. bakteritsiidseid lampe kasutatakse laialdaselt ruumide steriliseerimiseks meditsiini-asutustes.

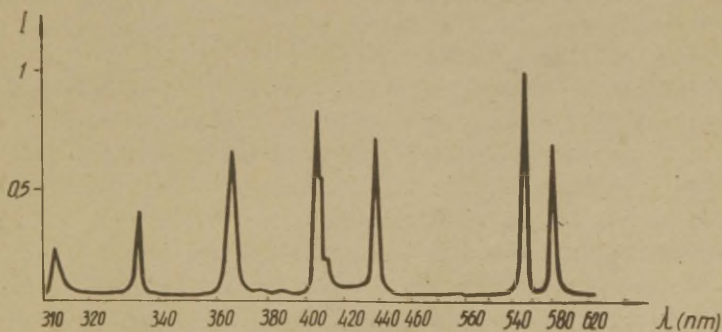
Kõrgrõhulampides (Hg-auru rõhk kuni 3 at) toimub madal-

rõhulampidega võrreldes (vt. tabel 1) kiirguse intensiivsuse ümberjaotus pikema lainepikkusega joonte kasuks. Esineb ka pidev foon, mis moodustab mõne protsendi kogu kiirgusest. Levinumad on ΠPK tüüpi lambid, mida kasutatakse kunstliku kõrgustikupäikese seadmetes.

T a b e l 1

$\lambda (nm)$	$I (\%)$ БУФ-30	$I (\%)$ ПРК-4	$\lambda (nm)$	$I (\%)$ БУФ-30	$I (\%)$ ПРК-4
254	100	25,6	313	2,3	67,9
265	0,14	23,0	365	1,98	100
280	0,046	10,1	405	8,6	35,9
289	0,18	5,0	436	14,2	61,5
297	0,42	14,1	546	13,5	70,5
303	0,23	32,1			

Ülikõrgrõhulampides on kaarlahendus koondunud väiksesse ruumiossa lähestikku asuvate elektroodide vahele, mistõttu kaare heledus on väga suur. Spektrit iseloomustavad tunduvalt laienenud jooned ja tugev pidev foon. Ultravioletne kiirgus lainepikkusega alla 260 nm praktiliselt puudub, kuna see neeldub kestaga piirnevates jähedamates Hg-aurudes. Joonisel 4 on toodud näitena CBDW-500 intensiivsuse spektraalne jaotus. Rõhk sellistes lampides tõuseb 10 - 30, mõnedes tüüpides isegi kuni 100 atmosfäärini, mistõttu lamp on lõhkemisohtlik. Nende kasutamine ilma kaitsekestata ei ole lubatud.

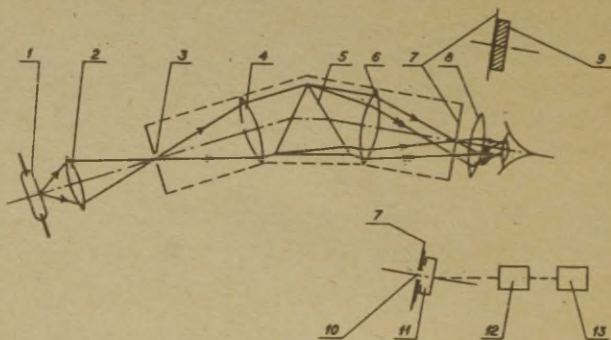


Joon. 4. CBDW-500 spekter.

Kõikide gaaslahenduslampide kasutamisel tuleb silmas pida, et neid ei tohi lülitada otse vooluvõrku, vaid ainult läbi voolu piirava elemendi (drossel või reostaat), sest temperatuuri tõustes lambi takistus muutub tühiseks, vool kasvab piiramatult ning lamp rikneb.

2. Spektraalriistade üldiseloostus.

Kiirgusvoo intensiivsuse spektraalse jaotuse määramiseks kasutatavaid seadmeid nimetatakse spektraalriistadeks. Spektraalriist koosneb järgmistest põhiosadest: kollimaator, disperseeriv süsteem (prisma või difraktsioonivõre) ja fokuseeriv süsteem. Joonisel 5 on toodud prisma-spektraalriista optiline põhimõtteskeem ja kiirte käik.

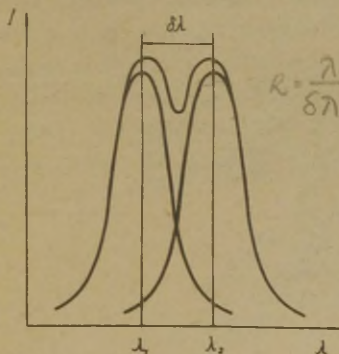


Joon. 5. Spektraalriistade põhimõtteskeem.

Uuritav kiirgus allikast 1 suunatakse sisendpilule 3. Sageli kasutatakse selleks kondensorlääts 2. Objektiiv 4 ja selle fookuses asuv sisendpilu 3 moodustavad nn. kollimaatori, millest väljunud paralleelsed kiired suunatakse prismale 5. Prisma tahkudel valgus murdub ja kuna murdumisnäitaja sõltub lainepikkusest, siis pärast prisma läbimist on erineva lainepikkusega kiired kaldunud esialgsest suunast kõrvale erinevate nurkade võrra. Rõhutame, et sama lainepikkusega kiired jäävad omavahel paralleelseks. Need erinevas suunas levivad paralleelsete kiirte kimbud langevad fokuseeriva süsteemi objektiivile 6 (erinevate nurkade

all optilise peateljega) ja koonduvad spektraalriista fokaaltasandi 7 erinevates punktides, tekitades erinevat värvi sisendpilu kujutiste reaspektri. Heleduse jaotus spektraalriista fokaaltasandis järgib sisendpilule langeva kiirguse tegelikku spektrit ainult ligikaudselt. Iga spektraalriist tekitab rea moonutusi, millest olulisim on spektrijoo-
ne laienemine ja sellega seoses lähestikku asuvate joonte kokkusulamine. Tähtsateks spektraalriista karakteristikuteks, mis lubavad neid moonutusi hinnata, on dispersioon ja lahutusvõime. Eristatakse nurk- ja joondispersiooni. Nurkdispersiooniks nimetame suurust $\frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}$, kus $\Delta \varphi$ on nurk, mille all levivad kaks $\Delta \lambda$ võrra erineva lainepikkusega kimpu pärast disperseeriva süsteemi läbimist. Joondispersioon avaldub suhtena $\frac{\Delta \ell}{\Delta \lambda}$, kus $\Delta \ell$ on nimetatud kimpude koon-
dumisel fokaaltasandis tekkinud sisendpilu kujutiste vaheline kaugus.

Lahutusvõimeks nimetatakse spektraalriista võimet eraldada kaht lähestikku asuvat spektrijoont. Tema arvulise karakteristikuna kasutatakse suhet $\frac{\lambda}{\delta \lambda}$, kus $\delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ on kahe veel eristatava spektrijoone lainepikkuste vahe, λ - nende lainepikkuste aritmeetiline keskmine (vt. joon. 6).



Joon. 6. Lahutusvõime selgitamiseks.

Kõrge lahutusvõime saamiseks on tarvilik küllaldaselt suur dispersioon, kuid see pole veel piisav tingimus.

Kahe lähedase spektrijoone eraldi nägemine sõltub veel spektraalmaksimumide laiuusest, Vastavalt Rayleigh' kriteeriumile loetakse spektrijooned täielikult lahutatavaks, kui ühe maksimumi keskkohast ühtib teise maksimumi äärega, s.o. kohaga, kus intensiivsus on null. Sel juhul moodustab intensiivsus joonte vahele jää-

vas miinimumis 80 % maksimumi intensiivsusest.

Spektrijoone kontuuri (fokaaltasandis saadava sisendpilu

kujutise intensiivsuse jaotuse kõvera) laius, seega ka lahutusvõime on oluliselt määratud sisendpilu laiusega. Väga kitsaste pilude korral saab lahutusvõimet piiravaks teguriks spektrijoone laienemine difraktsiooni tõttu kimbu laiust piiraval aval. Selle moodustavad tavaliselt disperseeriva süsteemi piirjooned.

Sõltuvalt spektrite vaatlemise ja registreerimise meetodist eristatakse 3 tüüpi spektraalriistu: spektroskoobid, spektrograafid ja spektromeetrid. Spektroskoopides vaadeldakse spektreid visuaalselt okulaari 8 abil (vt. joon. 5). Spektrograafides registreeritakse spekter fotoplaadile või filmile 9, mis asetatakse spetsiaalsete kassettidega väljundobjektiivi fokaaltasandisse 7. Spektromeetrites asetatakse objektiivi 4 fookusesse väljundpilu ja selle taha kiirguse vastuvõtja 11 (fotoelement, fototakisti, fotoelektronkordisti jt.), mis muundab valgusenergia elektriliseks signaaliks. Vastuvõtjast saadud signaal võimendatakse võimendi 12 abil ja registreeritakse kas osutmõõteriista, ostsillograafi, isekirjutaja või mõne muu seadmega 13. Suunates spektri erinevad osad üksteise järel väljundpilule, saame registreeriva seadme näitude põhjal koostada uuritava kiirguse intensiivsuse spektraalse jaotuse kõvera. Spektromeetri optiline osa kujutab oma olemuselt iseseisvat spektraalriista, mida kasutatakse monokromaatse kiirguse eraldamiseks spektrist ning nimetatakse seetõttu monokromaatoriks. Monokromaatse kiirguse all mõistame antud juhul kitsasse lainepikkuste vahemikku kuuluvat kiirgust. Monokromaatsuse aste on määratud selle vahemiku laiusega.

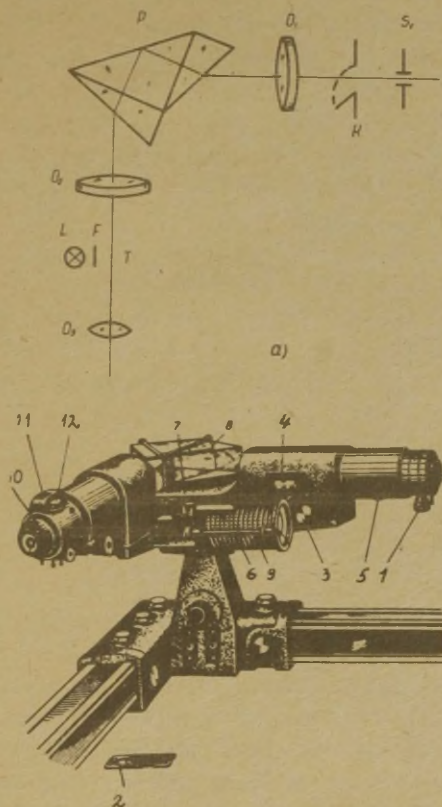
Praktiline osa

1. Monokromaatori YM -2 kirjeldus.

Monokromaator YM -2 on ette nähtud kitsaste spektrivahemike väljaeraldamiseks nähtavas ja lähedases infrapunases osas (lainepikkuste vahemikus 380 - 1000 nm). YM -2 on komplekteeritud kahe vahetatava otsikuga, mis võimaldab kasutada

teda nii monokromaatorina kui spektroskoobina. Käesolevas töös kasutame teda spektroskoobina. Joonisel 7 on toodud YM-2 spektroskoobivariandi optiline skeem (a) ja välisvaade ilma prisma katteta (b).

YM-2 optiline skeem erineb joon. 5 toodust ainult selle poolest, et siin on kasutatud nn. 90° -se konstantse kaldeuruga Abbé prisma P. Prisma on asetatud nii, et läätse O_2 fookusesse, kus asub teravik T (monokromaatorivariandis väljundpilu) koonduvad need kiired, mis moodustavad siseneva kiirtekimbuga täisnurga.



6)
Joon. 7. YM-2 skeem ja välisvaade.

Vaatleme YM-2 spektroskoobivariandi juhtmehhanismide paigutust ja nende otstarvet.[✱] Mikromeeterkruvi 1 abil reguleeritakse sisendpilu S_1 laiust. Vähima jaotuse väärtus tema trumlikesel on 0,01 mm. Pilu ette on võimalik asetada kiilukujulise avaga diafragma 2, mille nihutamisega saab muuta pilu kõrgust. Kruvi 3 pööramisega on võimalik nihutada kollimaatori objektiivi O_1 piki optilist telge. See on vajalik selleks, et sisendpilu kujutis tekiks iga lainepikkuse korral teravikuga T samas tasandis. Automaatselt see tingimus täidetud ei ole, sest objektiivide O_1 ja O_2 fookuskaugused sõltuvad lainepikkusest. Objektiivi O_1 asendi saame määrata aknast 4 näha oleva nooniusuga millimeeterskaala abil. Käepideme 5 abil saame sulgeda või avada katiku K, mis tõkestab valguse tee. Trumli 6 pööramisel pöörub prisma alus 7 koos prismaga 8 ümber vertikaalse telje. Prisma pööramine võimaldab tuua teraviku T kohale mis tahes lainepikkuse YM -2 spektraalpiirkonnast. Trumlile on kantud selle pöördenurgad vähima jaotuse suurusega 2° . Luges võetakse mööda spiraalset vagu libiseva limbi 9 kriipsu asukoha järgi. Spektri vaatlemine toimub okulaari O_3 abil, mis teravustatakse teravikule rõngakujulise käepideme 10 pööramisega. Katte 11 all asub teravikku valgustav lambike L ja selle ees ketas 12 valgusfiltritega F. Ketta 12 pööramisega saame vahetada filtreid, mistõttu on võimalik valgustada teravikku igas spektri piirkonnas spektri joonele lähedase värvi valgusega. Vastasel korral poleks teravik ja spektri joon okulaaris samaaegselt teravad, sest ka okulaari O_3 fookuskaugus sõltub lainepikkusest.

2. Spektroskoobi gradueerimine

Spektroskoobi gradueerimine seisneb gradueerimiskõvera koostamises, mis seab vastavusse teravikule langeva valguse lainepikkuse ja prismat pöörava trumli pöördenurga väärtused. Gradueerimiseks kasutame tuntud joonspektriga valgusallikaid, tavaliselt H, He, Hg, Na, Ne või mõnda muud

[✱] Käesolevas juhendis mitte mainitud.

elementi sisaldavaid gaaslahenduslampe.

Kasutatava lambi asetame sisendpilu ette kollimaatori optilisele teljele. Laiema helenduva pinnaga valgusallikate puhul õnnestub see ilma erilise kontrollita. Väiksemate mõõdetega ja kaugemal asuvate lampide korral peab aga kindlasti kontrollima, kas helendav pind asub optilisel teljel, Selleks valime sisendpilu laiuseks ja kõrguseks umbes 0,5 mm ja eemaldame okulaari. Kui nüüd vaadata valgusallikat läbi monokromaatori, on ta nähtav prisma asendile vastava lainepikkusega valguses. Õige asendi korral on valgusallika kujutis nähtav vaatevälja keskel. Vajaduse korral nihutame lampi tasandis, mis on risti optilise teljega. Pärast valgusallika paigaldamist paneme okulaari tagasi oma kohale.

Alustame gradueerimist spektri punasest piirkonnast. Selleks fokuseerime okulaari teravikule, olles eelnevalt sisse lülitanud teravikku valgustava lambi (lüliti "Указатель") ja keeranud lambi ette punase filtri. Valime pilu laiuseks ca 0,1 mm ja kõrguseks 2 - 5 mm. Pöörame trumlit 6 nii, et punaselt valgustatud teravik ühtiks mõne intensiivsema punase spektrijoonega. Nüüd võrdleme, kas teravik ja spektrijoon on mõlemad okulaaris teravalt nähtavad ja kas teraviku ja spektrijoone vastastikune asend ei sõltu silma asendist. Kui silma liigutamisel vasakule-paremale spektrijoon ja teravik üksteise suhtes nihkuvad, s.t. esineb nn. parallaktiline nihe, ei ole spektrijoon ja teravik samas tasandis. Jälgime näitlikkuse mõttes parallaktilise nihke tekkimist kahe üksteise taha asetatud pliiatsi vaatlemisel, võrdleme seda okulaaris nähtuga ja püüame teha järelduse, kuhupoole on tarvis nihutada objektiivi O_1 , et viia sisendpilu kujutis teraviku tasandisse. Järgnevalt nihutamegi objektiivi O_1 kruvi 3 pööramisega seni, kuni parallaktiline nihe on kadunud. Nüüd ei sõltu teraviku ja spektrijoone vastastikune asend, seega ka trumlilt võetud lugem, silma asendist. Trumli lugemi ja kollimaatori objektiivi asendi kirjutame tabelisse vaatlusprotokollis. Samasse tabelisse märgime veel spektrijoone värvuse ja suhtelise intensiivsuse (väga tugev - v.t., tugev - t., keskmine - k., nõrk - n., väga nõrk - v.n.). Nii fikseerime kõigi YM -2 spekt-

raalpiirkonnas näha olevatele spektrijoontele vastavad trumli näidud kahel korral, lähenedes joonele mõlemal korral samalt poolt. Kollimaatori objektiivi asendid, mille korral teraviku ja sisendpilu kujutis on parallaksivabad, määrame vaid erinevate (punase, kollase, rohelise, sinise, violetse) spektripiirkondade keskel asuvate joonte jaoks. Seejuures kasutame vastavalt sama värvi filtreid.

T a b e l 2

Nr.	Skaala näit		Kollimaatori läätsse asend	Inten- siiv- sus	Värvus	Laine- pikkus (nm)
	I mõõt- mine	II mõõt- mine				
1.						
2.						
...						

Gradueerida võib ka valgustamata teravikuga. Sageli on see isegi mugavam, eriti siis, kui spektris esineb pidev foon. Sel juhul keerame esialgu sisendpilu laiaks, et selle taustal teravik selgelt nähtav oleks. Seejärel viime teraviku ligikaudu joone keskele. Kruvi 3 pööramisega likvideerime teraviku ja joone parallaksi ning, vähendades sujuvalt pilu laiust, keerame teise käega trumlit nii, et teravik jääks kitsa joone kohale.

Saadud tabeli alusel koostame gradueerimiskõvera vähemalt protokollilehe suurusle millimeeterpaberile, kusjuures peame silmas, et kogu lehe pind oleks otstarbekalt kasutatud. Registreeritud trumli skaala näitude ja lainepikkuste vastavusse seadmist alustame tugevatest, kergesti äratuntavatest joontest. Hg-spektris on nendeks kollane kaksikjoon lainepikkusega 579,1 ja 577,0 nm, roheline - 546,1 nm, sinine 435,8 nm ja violetsed 407,8 ning 404,7 nm. Teiste joonte lainepikkused täpsustame gradueerimiskõvera koostamise käigus, jälgides, et saadud kõver oleks sile (sujuvalt muutuva tõusuga) ja kõik punktid langeksid kõverale. Jooned, mis ei lange siledale kõverale, on kas vales-

ti mõõdetud või on neile omistatud vale lainepikkus.

3. Tundmatu lambi kiirgusspektri uurimine.

Asendame gradueerimiseks kasutatud Hg-lambi juhendaja poolt näidatud lambiga ja määrame selle spektris kõiki eespool toodud nõudeid silmas pidades intensiivsemate joonte jaoks trumli skaala näidud. Gradueerimiskõverat kasutades saame teada nende joonte lainepikkused. Saadud lainepikkuste võrdlemise teel spektrijoonte tabelitega määrame elemendi, millele need kuuluvad. Sellega oleme määranud elemendi, mida uuritav lamp sisaldab.

Küsimused

1. Selgitage mõistet "spekter"?
2. Miks erineb joonisel 3 toodud Päikese spekter UV-piirkonnas oluliselt absoluutselt musta keha spektrist?
3. Kas on võimalik selline hõõglamp, mille kiirguse spektraalne jaotus oleks lähedane Päikese kiirguse omaga?
4. Missuguseid seadmeid on tarvis spektraalanalüüsiks?
5. Miks pole ruumide steriliseerimiseks otstarbekas kasutada kõrg- ja ülikõrgrõhu Hg-lampe?
6. Miks pole kunstliku kõrgustikupäikese seadmetes lubatud kasutada madalrõhu ega ka ülikõrgrõhu Hg-lampe?
7. Missuguseid dispergeerivaid süsteeme peale prisma kasutatakse veel spektraalriistades?
8. Selgitage lahususvõime mõistet joonise 6 abil.
9. Selgitage kiirte käiku Abbé prisma.

Kirjandus

1. Haav, A. Optika II. Tartu, 1973, lk. 42 - 57.
2. Лаврова И.В. Курс физики. - М.: Просвещение, 1981, с. 194 - 198.
3. Ливенцев Н. М. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1978, с. 231 - 238.

Tööülesanne

Tutvuda valguse polarisatsiooni nähtusega. Määrata suhkru kontsentratsioon vesilahuses sahharimeetri abil.

Töövahendid

Sahharimeeter koos valgusallikaga. Kuvett suhkrolahusega.

Teoreetiline sissejuhatus

1. Loomulik ja lineaarselt polariseeritud valgus.

Valgus on elektromagnetiline lainetus, kus elektri- ja magnetvälja tugevuse perioodiline muutumine toimub risti valguse levimise suunaga. Seejuures on ka elektrivälja ja magnetvälja tugevuse vektorid omavahel risti (joon. 1).



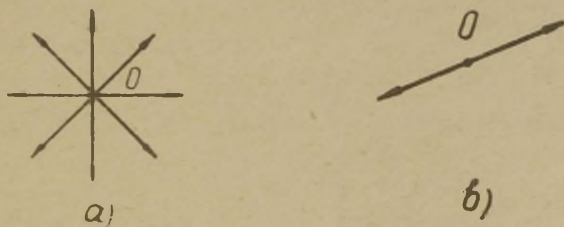
Joon. 1. Elektromagnetilise tasalaine levimine.

\vec{E} - elektrivälja tugevuse vektor, \vec{H} - magnetvälja tugevuse vektor.

Elektrivälja tugevuse vektori ja valguse levimissuunaga on ruumis määratud tasand, mida nimetatakse valguse võnketasandiks. Võnketasandis muutub elektrivälja tugevus (s.t. võngub vektor \vec{E}) ajas (fikseeritud ruumpunkti korral) ja ruumis (fikseeritud ajahetkel) sinusoidaalselt.

Helenduva keha (valgusallika) kiirgus koosneb keha aatomite poolt kiiratud elektromagnetilistest lainetest. Üksiku aatomi kiirgus vältab umbes 10^{-8} s. Selle aja jooksul moodustub laine pikkusega ligikaudu 3 m (s.o. nn. lainejada). "Kustunud" aatom "süttib" pärast mõningase aja möödumist uuesti. Kui jälgime valguse levikut ikka ühes ja samas suunas, siis selgub, et uues lainejadas võngub elektrivälja tugevuse vektor tasandis, mis ei tarvitse ühtida eelmise lainejada võnketasandiga. Peale selle on uuel lainejadal elektrivälja tugevuse võnkumise faas erinev, võrreldes eelmise lainejadaga. Ühel ajal kiirgab suur hulk aatomeid. Nende kiiratud lainejadad, liitudes üksteisega, moodustavadki keha poolt kiiratud valguslaine. Iga lainejada võnketasandi asend on juhuslik, seepärast on erinevate sihtidega elektrivälja tugevuse vektori võnkumised liitlaines keskmiselt võrdse tõenäosusega. Sellist valgust nimetatakse loomulikuks valguseks (vt. joon. 2,a).

Kui elektrivälja tugevuse vektor võngub ühes kindlas tasandis, siis sellist valgust nimetatakse lineaarselt polariseeritud valguseks (joon. 2,b).

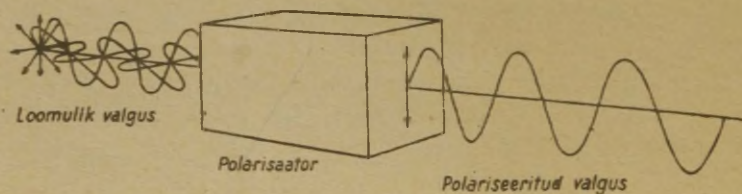


Joon. 2. Vektori \vec{E} võnkumise suunad loomulikus (a) ja polariseeritud (b) valguses. Valguskiire O levimise suund on risti joonise tasandiga.

Mitmesuguste vahenditega, mida nimetatakse polarisaatoriteks, on loomulikust valgusest võimalik saada polariseeritud valgust. Nii näiteks tekib polariseeritud valgus peegeldumisel läbipaistvatelt kehadelt. Selle kohta on kehtiv Brewsteri seadus, mis väidab, et peegeldunud kiir on täielikult polariseeritud, kui peegeldunud ja murdunud kiire vaheline nurk on 90° .

Täielikult polariseerivad neid läbivat valgust mõned kristallid. Lubipaokristalli läbiv kiir jaguneb kaheks kiireks, kusjuures mõlemad kiired on kindlasuunaliselt polariseeritud ja nende võnketasandid on omavahel risti. Kasutades Nikoli prisma, on võimalik üht kiirt kõrvaldada.

Polarisaatorina võib näiteks kasutada ka polaroidi - tselluloidkilet, milles on suur hulk ühesuguselt orienteeritud jodohiniinsulfaadi kristallikesi. Polaroid neelab valguse selle komponendi, mis on suunatud piki molekulide telje, temaga ristioleva komponendi laseb läbi väga väikese neeldumisega. Seetõttu loomulik valgus, läbides polaroidi, muutub lineaarselt polariseerituks.



Joon. 3. Polariseeritud valguse tekkimine loomulikust (polariseerimata) valgusest.

Kui polarisaatorit kasutatakse juba eelnevalt polariseeritud valguse uurimiseks, siis nimetatakse teda analüsaatoriks. Seadet, mis koosneb polarisaatorist ja analüsaatorist, nimetatakse polarimeetriks. Polarisaatorina kasutatav polaroid on polarimeetris kinnitatud liikumatult. Analüsaatorit võib aga pöörata ümber telje, mis ühtib valguse levimissuunaga. Polarimeetril on ringskaala, mille abil saab määrata analüsaatori pöördenurka. Analüsaatorit läbinud valguse intensiivsus sõltub polarisaatori ja analüsaatori poolt teki-

tatud võnkumistasandite vahelisest nurgast. Kui nimetatud võnketasandid on paralleelsed, siis on analüsaatorit läbinud valgus maksimaalse intensiivsusega, kui aga risti, siis minimaalse intensiivsusega.

2. Optiline aktiivsus, aine eripöörang.

Polarisatsiooniparaate kasutatakse ainete uurimiseks, mis pööravad neid läbiva polariseeritud valguse võnketasandid. Niisuguseid aineid nimetatakse optiliselt aktiivseteks. Nende hulka kuuluvad mõned kristalsed ained (näiteks kvarts), puhtad vedelikud (näiteks tärpentiin, nikotiin) ja optiliselt aktiivsete ainete lahused (näiteks suhkru- ja viinhappe vesilahused).

Kui asetame polarimeetris risti olevate polarisaatori ja analüsaatori vahele suhkrulahusega täidetud toru, siis selgub, et valgus läbib analüsaatorit. Valguse läbipääsu tõkestamiseks peame analüsaatorit teatava nurga ψ võrra pöörama. Sellest järeldub, et suhkrulahuse läbimisel pöördub valguse võnketasand nurga φ võrra. Väikestel kontsentratsioonidel on pöördnurk võrdeline lahusekihi paksusega l ning optiliselt aktiivse aine kontsentratsiooniga c .

$$\psi = [\alpha]_{\lambda}^t c l. \quad (1)$$

Kordajat $[\alpha]_{\lambda}^t$ nimetatakse eripööranguks. Eripöörang oleneb eelkõige ainest, lahuse temperatuurist ja kasutatava valguse lainepikkusest. Näiteks $[\alpha]_D^{20}$ tähendab eripöörangut Na D-joone lainepikkusel 589,3 nm ja temperatuuril 293 K (20°C).

Lahuste puhul eripöörang $[\alpha]$ defineeritakse pöördenurgana, mille tekitaks 1 dm paksune lahusekiht kontsentratsiooniga 1 (s.t. lahuse 1 cm³ sisaldab 1 g optiliselt aktiivset ainet).

Selleks, et määrata eripöörang valguse teatud kindlal lainepikkusel, kasutatakse polarimeetrites valgusfiltrit,

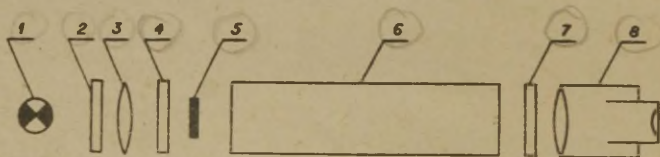
mis eraldab vajaliku lainepikkuse valguseallika spektrist.

Määrates polarimeetri abil pöördenurga ψ , teades aine eripöörangut $[\alpha]$ ja lahuse kihi paksust l , saab leida optiliselt aktiivse aine kontsentratsiooni antud lahuses. Meditsiinis kasutatakse võnketasandi pöördenurga mõõtmist suhkru kontsentratsiooni määramiseks haige uriinis.

Polarimeetrit, mida kasutatakse suhkru kontsentratsiooni määramiseks, nimetatakse sahharimeetriks.

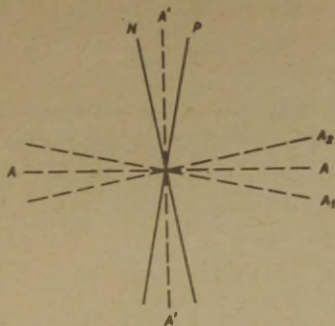
3. Sahharimeeter.

Võnketasandi pöördenurga määramiseks valguse läbiminekul optiliselt aktiivsest lahusest kasutatakse poolvarju polarimeetrit (joon. 4). Kasutatav poolvarju polarimeeter koosneb valgusallikast 1, valgusfiltrist 2 monokromaatse valguse saamiseks, koondavast läätest 3 paralleelse kiirtekimbu saamiseks, polarisaatorist 4, väikesest kvartsplaadist 5 vaatevälja keskel, küvetist 6 uuritava lahusega, analüsaatorist 7 ja pikksilmast 8.



Joon. 4. Poolvarju polarimeeter.

Analüsaator on kinnitatud pööratavale kettale, pöördenurga leiame ringskaalalt. Kvartsplaadikese ülesandeks on tekitada väikene võnketasandi pöördumine tema poolt kaetud vaatevälja osas. Joonisel 5 on polarisaatorit läbiva valguse võnketasand tähistatud sirgega P, täiendavalt veel kvartspladikest läbinud valguse võnketasand - sirgega N. Kui analüsaatori poolt tekitatud võnketasand on risti tasandiga P või N (punktiirjooned A_1 ja A_2 joonisel 5), siis vaateväljas kas vaatevälja äär või siis keskosa on tume. Kui analüsaator on asendis A, siis vaateväli on kõikjal



Joon. 5. Võnketasandite asendid.

ühtlaselt nõrgalt valgustatud, see asend tuleb võtta analüsaatori nullasendiks. Asendi A' kasutamisel on mõõtmiste täpsus väiksem (miks?).

Kui me ei kasutaks kvartspilaati, tuleks nullasendiks võtta analüsaatori asend, mille puhul vaateväli on kõige tumedam. Seda on aga silma järgi raske kindlaks teha.

Sahharimeetris ongi seepärast vaateväli jagatud osadeks ja nullasendi leidmiseks tuleb silma järgi võrrelda vaatevälja erinevate osade heledust, mida on võimalik teha küllalt suure täpsusega.

Analüsaatori asend on määratav nooniusega varustatud ringskaalalt. Vaatleme lähemalt näidu määramist sahharimeetri skaalalt nooniususe abil. Noonius on abiskaala, mille abil on kerge määrata põhiskaala murdosasid. Antud sahharimeetri puhul on nooniususe jaotised lühemad kui põhiskaala (ringskaala) jaotised - 19-le põhiskaala jaotisele vastab 20 nooniususe jaotist. Veenduge selles, pannes nooniususe 0-jaotise ühtima põhiskaala 0-jaotisega.

Seega nooniususe jaotise väärtus on $\frac{19^\circ}{20} = 0,95^\circ$ (põhiskaala jaotis on 1°). Jaotiste väärtuste erinevust $1^\circ - 0,95^\circ = 0,05^\circ$ nimetatakse nooniususe täpsuseks. Nooniususe täpsus näitab, missuguse täpsusega saame võtta lugemeid antud riista puhul, s.t. ta on riista lubatud veaks. Nooniususe täpsust võib leida ka jagades põhiskaala jaotise väärtuse nooniususe jaotiste arvuga.

Ringskaala näidu täisosa määrame antud asendis selle põhjal, mitu täiskraadi jääb nooniusse O-kriipsust vasakule. Näidu murdosa määrame nooniusse abil. Selleks leiame, mitmes nooniusse jaotis langeb täpselt kokku põhiskaala jaotisega. Olgu see näiteks n nooniusse jaotis. Skaalanäidu murdosa leiame siis korrutades nooniusse täpsuse arvuga n . (Meie riista puhul $0,05^{\circ}$ n.)

Et lugemeid parem oleks võtta, on pikksilm varustatud väikeste abiluupidega.

Töö käik

1. Tutvume sahharimeetriga ja lugemi võtmisega analüsaatori skaalalt nooniusse abil.

2. Määrame analüsaatori nullasendi (asend A joonisel 5) ilma uuritava lahusega. (Asendit A' ei kasutata tema määramise väiksema täpsuse tõttu.) Selleks lülitame sisse sahharimeetri lambi ja teravustame pikksilma ühele kvartsplaadikese servadest. Väike kvartsplaat on pikksilmas nähtav selle vaatevälja läbiiva ribana. Pöörates analüsaatorit leiame sellise asendi, kus vaateväli on ühtlaselt nõrgalt valgustatud. Määrame skaala lugemid N_1^I , N_1^{II} kasutades mõlemat nooniust. (N_1^I - lugem esimese nooniusse puhul, N_1^{II} - teise nooniusse puhul.)

3. Paigutame küveti uuritava lahusega polarisaatori ja analüsaatori vahele. Küveti (toru) pikkus, s.t. lahusekihi paksus l on märgitud küveti küljele.

Fokuseerime uuesti pikksilma. Selgub, et vaateväli pole nüüd enam ühtlaselt valgustatud. Ühtlaselt nõrga valgustatuse saavutamiseks tuleb analüsaatorit pöörata esialgse asendi suhtes mingi nurga võrra. Määrame selle uue analüsaatori asendi, kasutades jällegi mõlemat nooniust - saame lugemid N_2^I ja N_2^{II} .

Analüsaatori skaala näitude vahe (ilma uuritava lahusega ja uuritava lahusega) annabki meile võnketasandi pöördenurga ψ .

Kordame mõõtmisi, pöörates analüsaatorit 180° võrra.

Ühe lahuse puhul teeme vähemalt kaks mõõteseariat. Andmed koondame tabelisse. Leiame pöördenurkade ψ aritmeetilise keskmise $\bar{\psi}$.

Küveti pikkus $l = \dots$ dm

Lahuse kontsentratsioon	Mõõtm. jrk.	N_1^I	N_1^{II}	N_2^I	N_2^{II}	$N_2^I - N_1^I$	$N_2^{II} - N_1^{II}$
	1						
	2						
	.						
	.						
	.						

Keskmine väärtus $\bar{\psi} = \dots$

4. Saadud andmete põhjal leiame uuritud suhkrulahuse kontsentratsiooni:

$$c = \frac{\bar{\psi}}{[\alpha]_D^{20} l}$$

Kui nurk ψ on mõõdetud kraadides, küveti pikkus l - dm-tes, ja teame aine eripöörangut, siis saame suhkru sisalduse grammides 1 cm^3 lahuse kohta. Praktikumis kasutata- va suhkru eripöörang on $[\alpha]_D^{20} = 66,5 \frac{\text{kraad} \cdot \text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{dm}}$.

5. Leiame vähemalt kolmeerineva suhkrulahuse kontsent- ratsioonid. Joonestame graafiku $\frac{\psi}{l} = f(c)$.

Lisaküsimusi

1. Selgitage loomuliku valguse ja lineaarselt polarisee- ritud valguse mõistet.
2. Selgitage mõistet "optiline aktiivsus".
3. Mis on eripöörang?
4. Milliseid valguse polariseerimise meetodeid teate?

Kirjandus

1. Saveljev, I. Füüsika üldkursus. 3. - Tln.: Valgus, 1979, lk. 118 - 126.
2. Ливенцев Н.М. Курс физики. I. М., 1978, с. 242 - 248.

K A H K Ü M M E E S I M E N E t ö ö

FOTOELEMENTI KASUTAMINE LUKSMEETRINA

Tööülesanne

Gradueerida fotoelement. Mõõta tundmatu valgustugevusega lambi valgusvoo jaotus.

Töövahendid

Tõkkekiht-fotoelement, mikroampermeeter, takistussalv, tuntud valgustugevusega valgusallikas, trafod, stabi-lisaator, optiline pink ratsuritega, diafragma, uuritav lamp goniomeetril, joonlaud.

Töö käik

Fotomeetrilised suurused ja nende ühikud.

Valgusaistingu põhjustab elektromagnetilise laine ($\lambda = 380 - 760 \text{ nm}$) toime silma võrkkesta valgustundlikele elementidele - kolvikestele ja kepiketele (fotoretseptoritele). Kolvikesed moodustavad tsentraalse, päevase ja värvinägemise aparaadi, kepikesed aga perifeerse, öise ja akrömaatilise nägemise aparaadi.

Silma tundlikkus toodud lainepikkuste vahemikus on muutuv. Päevavalguses on inimese silm kõige tundlikum valgusele, mille lainepikkus on 555 nm (rohekas-kollane spektri piirkond)

Öises valguses nihkub silma tundlikkuse maksimum 510 nm-le (rohekas-sinine spektri piirkond).

Fotoretseptorite valgustundlikkus sõltub ka valgusärri-tuse tugevusest. Sellist omadust nimetatakse silma adaptat-

siooniks.

Silma tundlikkust iseloomustab spektraalne valgusefektiivsus

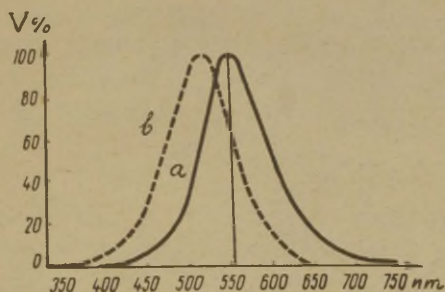
$$K(\lambda) = \frac{d\Phi_v}{d\Phi_e}$$

Siin on Φ_v valgusvoog. Valgusvooks nimetatakse ajaühikus läbi mingi pinna kandunud kiirgusenergiat, mida hinnatakse nägemisaistingu järgi. Φ_e - elektromagnetilise kiirguse võimsus, mis kutsub esile valgusvoo Φ_v . Suurused $d\Phi_v$ ja $d\Phi_e$ vastavad väikesele lainepikkuste vahemikule λ kuni $\lambda + d\lambda$.

Suhteliseks spektraalseks valgusefektiivsuseks nimetatakse suhet

$$\bar{V}(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}$$

kus K_m on maksimaalne valgusefektiivsus ($\lambda_{max} = 555$ nm päevanägemise jaoks ja 510 nm öönägemise jaoks). Suhtelise spektraalse valgusefektiivsuse kõverad "keskmise" inimsilma korral on toodud joonisel 1.



a - suhtelise valgusefektiivsuse kõver päevanägemise jaoks, b - öönägemise jaoks

Elektromagnetilise kiirguse võimsust mõõdetakse kiirgusühikutes - vattides (W), energiat džaulides (J), intensiivsust - W/m^2 jne.

Kirjeldatakse nüüd valgussuursusi ja valgusühikuid. Põhi-

ühikuks SI-s, mille abil defineeritakse visuaalse fotomeetria ühikud, on kandela (kd) - valgusallika valgustugevuse ühik.

Valgustugevus on ühikulise ruuminurga kohta tulev valgusvoog

$$I = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} ,$$

kus $d\Phi_v$ on ruuminurka $d\Omega$ kiiratud valgusvoog.

Kandela - kiirgusallika antudsuunaline valgustugevus, kui allikas kiirgab monokromaatilist kiirgust sagedusega $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ja kui tema kiirgustugevus samas suunas $\frac{1}{683} \text{ W/sr}$.

Valgusvoo ühikuks on lumen (lm). 1 lumen on valgusvoog, mida kiirgab punktvalgusallikas valgustugevusega 1 cd ruuminurka suurusega 1 steradian (sr).

Tuletame meelde: punktvalgusallikaks võib pidada sellist kiirgavat keha, mille mõõtmed on palju väiksemad kui kaugus allikast vaatluspunktini; 1 steradian on võrdne raadiuse ruudu suurusele kerapinna osale toetuva koonuse ruuminurgaga, mille tipp asub kera tsentris.

Valguse mõju pinnale, kuhu ta langeb, iseloomustatakse valgustatusega. Valgustatust E mõõdetakse pinnale langeva valgusvoo Φ_v ja selle pinna suuruse S suhtega:

$$E = \frac{\Phi_v}{S} . \quad (1)$$

Valgustatuse ühik on luks (lx). 1 luks on valgustatus, mida põhjustab valgusvoog 1 lm ühtlasel jaotusel 1 m^2 pinnale.

Praktikas on tähtis teada, kuidas sõltub valgustatus valgustugevusest I ja kaugusest r valgusallika ja pinna vahel. See seos avaldub järgmiselt:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2} , \quad (2)$$

kus α on nurk kiirte ja pinnanormaali vahel.

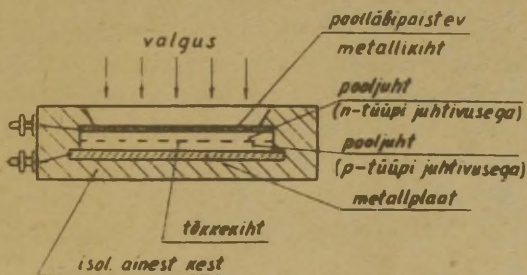
Lisaks loetletud suurustele kasutatakse veel teisigi, nagu heledus, valgus jne.

Valgussuurused ja kiirgussuurused on oma vahel seostatavad silma päevanägemise suhtelise spektraalse valgusefektiivsuse kõvera abil. Katseliselt on kindlaks tehtud, et päeva-standardvaatleja puhul maksimaalse spektraalse valgusefektiivsuse arvvärtus $K_m = 683 \text{ lm/W}$. Kui antud lainepikkusele vastab silma suhtelise valgusefektiivsuse funktsiooni väärtus $V(\lambda)$, siis energiavoole 1 W vastab valgusvoog $683 V(\lambda) \text{ lm}$.

Tõkkekiht-fotoelemendi ehitus.

Praktikas on sageli vaja fotomeetrilisi suurusi mõõta objektiivseis ühikuis. Sellisel juhul on sobiv valida selline valgustundlik element, mille spektraalne tundlikkus on sarnane silma spektraalse nähtavuse kõveraga. Selliseks elemendiks on näiteks seleenfotoelement. Teatavat spektraalsete tundlikkuste erinevust on võimalik kompenseerida valgusfiltritega.

Seleenfotoelemendi töö põhineb seesmisel fotoefektil, mis seisneb elektronide üleminekus valguse toimel valentssoonist juhtivustsooni ja vabade aukude tekkes valentssoonis. Fotoelemendi ehitus on toodud joonisel 2.



Joon. 2. Fotoelemendi ehitus.

Metallplaadile, mis on ka üheks elektroodiks, on kantud aukjuhtivusega Se-kiht. Viimane on omakorda kaetud õhukese hõbedakihihiga, mis on teiseks elektroodiks. Hõbeda aatomid difundeeruvad osaliselt ülemisse seleenikihti, tekitades seal elektronjuhtivust. Selle tulemusena moodustub pool-

juhi (Se) ülemise ja alumise kihi vahel tõkkekiht, millel tekib kontaktpotentsiaalide vahe. Valguse langemisel pooljuhi ülemisele pinnale tekivad fotoefekti tulemusena vabad elektronid ja augud. Elektronid, mis on põhilised laengukandjad selles kihis, tõkkekihti ei läbi, aga augud liiguvad kontaktpotentsiaalide vahe toimel alumisse kihti (p-pooljuhti). Analoogiliselt toimub elektronide liikumine alumisest kihist ülemisse.

Seega eralduvad valguse toimel tekkinud erinimelised laengud teine teisele poole tõkkekihti ja see põhjustabki elektromotoorjõu tekke.

Kui lülitada fotoelemendi klemmide külge mõõteriist, siis see näitab nn. fotovoolu, mille tugevus on võrdeline valgusvooga. Kui fotoelemendi valgustatud pindala ei muutu, siis on fotovoolu tugevus võrdeline pinna valgustatusega. Sellist olukorda on kõige lihtsam saavutada, kui valgustada alati kogu fotoelemendi pinda.

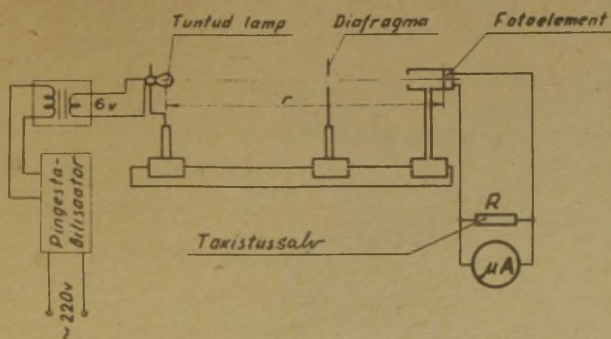
Ülaltoodust selgub, et fotoelementi võib kasutada valgustatuse mõõtmiseks luksmeetri põhiosana. Selleks tuleb aga fotoelement gradueerida, kasutades tuntud valgustugevusega valgusallikat.

Fotoelemendi gradueerimine.

Katsekorralduse skeem on toodud joonisel 3. Optilisel pingil on ratsureis fotoelement, etalonvalgusallikas (mille valgustugevus kindlal toitepingel on teada) ja diafragma. Valgusallikat toidetakse 220 V võrgust läbi stabilisator ja pinget alandava trafo. Fotoelemendi klemmide külge ühendatakse mikroampermeeter ja sellega paralleelselt takistussalv.

Valgusallika asetame fotoelemendist ca 20 cm kaugusele, viimasega samale kõrgusele, sest valguskiired peavad langevama võimalikult risti fotoelemendi pinnaga. Pingestame valgusallika ja reguleerime takistussalve abil mikroampermeetri näidu maksimaalseks. NB! Enne lülitamist jälgida, et takistussalve takistus oleks null ja takistust hakata suurendama väiksematest dekaadidest alates! Muidu võib liiga suur

vool mikroampermeetri rikkuda.



Joon. 3. Fotoelemendi gradueerimise skeem.

Diafragma tuleb paigutada nii, et ta ei varjaks fotoelemendi pinda lambist tuleva valgusvoo eest, samal ajal peab ta aga takistama ruumist lähtuva kõrvalise valguse langemist fotoelemendile.

Fikseerime joonlauaga kauguse r fotoelemendi aktiivse pinna ja lambi hõõgniidi vahel. Järgnevalt hakkame valgusallikat eemaldama sellistele kaugustele, et mikroampermeetri näit oleks võrdne 90 %, 80 %, . . . maksimaalsest näidust, mõõtes iga kord ka kauguse r . Tulemused kanname tabelisse:

Kaugus r (m)	Mikroampermeetri näit N (jaotist)	Valgustatus E (lx)

Valgustugevus $I = \dots$ cd.

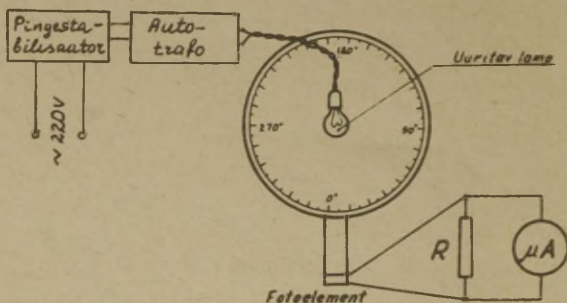
Takistussalve takistus $R = \dots \Omega$.

Saadud tulemuste põhjal koostame fotoelemendi gradueerimise

graafiku, kandes x-teljele valgustatuse E väärtused (lei-
takse valemist (2) eeldusel, et $\alpha = 0$) ja y-teljele mik-
roampermeetri näidud N.

Tundmatu lambi valgusvoo jaotuse mõõtmine.

Katseskeem on toodud joonisel 4.



Joon. 4. Valgusvoo jaotuse mõõtmise skeem.

Uuritavaks lambiks on tavaline elektripirn, mis asub goniomeetri pöörleval kettal. Gradueeritud fotoelemendi kinnitame hoidjasse samale kõrgusele pirniga, et valgus langeks risti fotoelemendi pinnaga. Lampi toidetakse läbi stabilisaatori ja autotrafo.

Tööpinge valime autotrafo abil sellise, et üheski gonio-
meetri näidiku asendis 0° kuni 360° mikroampermeetri näit
ei ületaks esimeses katses saadud maksimaalset näitu. NB!
Tuleb jälgida, et takistussalve takistus ja mikroampermeet-
ri mõõdupiirkonnad oleksid samad mis gradueerimiselgi.

Registreerime mikroampermeetri näidud iga 10° järel, pöö-
rates lampi koos goniomeetri kettaga. Tulemused kanname
tabelisse.

Valgustatuse sõltuvuse lambi pöördenuksest esitame po-
laarkoordinaatides. Selleks kasutame spetsiaalset diagramm-
paberit. Selle puudumisel valmistame diagrammpaberi iseseis-
valt. Valgustatuse väärtused leiame gradueerimisgraafikult
vastavalt mikroampermeetri näitudele ja, valinud sobiva

Lambi pöördenurk	Mikroampermeetri näit N (jaot.)	Valgustatus E (lx)
0		
10		
.		
.		
360		

mastaabi, kanname need diagrammpaberi raadiustele.

Küsimused.

1. Laua tsentri kohal, 1 m kõrgusel, asub lamp. Mitu korda on valgustatus 1 m kaugusel tsentrist väiksem valgustatusest tsentris?

2. Kas töökoha valgustatus sõltub hõõglambi spiraali kujust ja lambikupli omadustest?

3. Sõnastage fotoefekti kirjeldavad seadused.

4. Selgitage vaakumfotoelemendi ehitust.

5. Selgitage fotomeetrilisi suurusi ja nende ühikuid (valgustugevus, valgusvoog, valgustatus).

Kirjandus.

1. Saveljev, I. Füüsika üldkursus. III. Tln., 1979, lk. 14 - 19.
2. Ремизов А.Н. Курс физики. 2. М., 1976, с. 172 - 173.
3. Ливенцев Н.М. Курс физики. I. М., 1978, с. 263 - 266, II., с. 17 - 19.
4. Risthein, E. Valgustehnika sõnastik. Tln. 1982.

РУКОВОДСТВА К ПРАКТИКУМУ ПО ФИЗИКЕ
ДЛЯ НЕФИЗИКОВ III. ОПТИКА.
Составитель Хильда Т е р а л.
На эстонском языке.
Тартуский государственный университет.
ЭССР, 202400, г.Тарту, ул.Плюксоли, 18.
Vastutav toimetaja T. Müürsepp.
Paljundamisele antud 2.01.1984.
Formaat 60x84/16.
Rotaatoripaber.
Masinakiri. Rotaprint.
Tingtrükipoognaid 3,49.
Arvestuspoognaid 3,29. Trükipoognaid 3,75.
Trükiarv 500.
Tell. nr. 3.
Hind 10 kop.
TRÜ trükikoda. ENSV, 202400 Tartu, Pälsoni t. 14.